

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Caracterització de la cadena de tracció
d'un vehicle elèctric L7e Van**

MEMÒRIA

Autor: Escribano Periz, Carlos
Director: Hernández Chiva, Emilio
Convocatòria: Juny 2017



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte consisteix en dimensionar i caracteritzar la cadena de tracció d'un vehicle elèctric destinat al transport de mercaderies homologable a la categoria europea L7e.

En aquesta memòria s'explica breument la història dels vehicles elèctrics, la situació actual de la mobilitat urbana arreu del món i els conflictes que han sorgit al voltant d'aquesta, tan mediambientals com energètics.

Seguidament es fa un breu estudi de mercat on s'estudien algunes alternatives disponibles per als vehicles similars al que és objecte d'aquest projecte.

Posteriorment, es descriu la tecnologia que presenta la cadena de tracció d'un vehicle elèctric qualsevol, explicant els components que la formen, les tecnologies amb les que implementar aquests components i les diferents opcions que es troben actualment al mercat, així com les propietats d'aquestes i els avantatges i inconvenients d'algunes opcions alternatives per al mateix component.

Un cop definits els components i explicada la tecnologia, es fa una cerca al mercat actual per tal de trobar components que s'ajustin a les necessitats tècniques del vehicle a dissenyar. En base a aquesta cerca es fa una decisió sobre quins components implementar.

Finalment, es calculen les prestacions teòriques del vehicle, s'analitza l'impacte ambiental del conjunt del projecte i s'extreuen conclusions del procés dut a terme.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. INTRODUCCIÓ	7
1.1. Objectius del projecte.....	7
1.2. Abast del projecte	7
2. DESCRIPCIÓ DEL CONFLICTE	9
2.1. La contaminació de l'aire	11
2.2. Els recursos energètics.....	12
3. ESTUDI DE MERCAT	13
3.1. Comarth T-Truck Puerta corredera.....	14
3.2. Alkè ATX210E:.....	15
3.3. Alkè ATX230E:.....	16
3.4. Resum d'alternatives.....	17
4. LA CADENA DE TRACCIÓ	19
4.1. Esquemes d'implementació	19
5. MOTORS ELÈCTRICS	21
5.1. Motor de corrent contínua.....	21
5.2. Motor Brushless	22
5.3. Motor de reluctància variable.....	23
5.4. Motor d'inducció	24
6. BATERIES	26
6.1. Tecnologies disponibles.....	29
6.2. Bateries d'Ió-Liti.....	30
6.3. Seguretat i bateries	31
6.4. Mètodes alternatius d'emmagatzemament d'energia.....	31
6.4.1. Ultracapacitors	32
6.4.2. Volants d'inèrcia.....	32
7. COMPONENTS ELECTRÒNICS	34
7.1. Tecnologies disponibles.....	34
7.1.1. Díodes	35

7.1.2.	BJT de potència.....	35
7.1.3.	MOSFET de potència	35
7.1.4.	IGBT	36
7.2.	BMS	36
7.3.	Carregador de bateria.....	37
7.3.1.	Convertidors CA/CC	37
7.3.2.	Procés de càrrega	37
7.3.3.	Tipus i modes de càrrega	38
7.3.4.	Xarxa de carregadors	39
7.4.	Convertidor de potència principal.....	40
7.4.1.	Convertidors CC/CC	40
7.4.2.	Convertidors CC/CA	42
7.5.	Convertidor secundari.....	43
8.	PRESTACIONS	45
8.1.	Modelització.....	45
8.1.1.	Potència aprofitable del motor:	47
8.1.2.	Potència consumida per la fricció aerodinàmica:	47
8.1.3.	Potència consumida per la resistència al rodolament:.....	49
8.1.4.	Potència consumida en pujar una rampa:	50
8.1.5.	Potència consumida per les forces d'inèrcia:	50
8.2.	Càlcul de prestacions:	51
8.2.1.	Velocitat màxima del vehicle.....	52
8.2.2.	Pendent màxim de servei.	52
8.2.3.	Acceleració màxima.....	53
9.	DIMENSIONAMENT DE LA BATERIA	54
9.1.	Autonomia.....	54
9.2.	Cicles de conducció:.....	55
9.3.	Elecció del cicle	60
9.4.	Modelització del vehicle.....	61
10.	ESPECIFICACIONS REQUERIDES	64
10.1.	Normativa d'homologació	64
10.2.	Altres especificacions	64
11.	ELECCIÓ DELS COMPONENTS	66
11.1.	Motor de tracció	66
11.2.	Convertidor de tracció.....	68
11.3.	Bateria.....	70

11.3.1. Número de mòduls	70
11.4. BMS.....	71
11.5. Carregador de la bateria	72
11.6. Convertidor secundari.....	74
12. PRESTACIONS FINALS	76
12.1. Velocitat màxima	76
12.2. Càrrega màxima.....	76
12.3. Autonomia	77
13. PRESSUPOST	78
14. PLANIFICACIÓ TEMPORAL	79
15. IMPACTE AMBIENTAL	80
CONCLUSIONS	82
AGRAÏMENTS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
BIBLIOGRAFIA	83
Referències bibliogràfiques	83
Bibliografia consultada	83

1. Introducció

1.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és dimensionar i caracteritzar la cadena de tracció per a un prototip de vehicle elèctric per al transport de mercaderies homologable dins de la categoria europea L7e. Aquesta caracterització es fa bàsicament en base a criteris tècnics, pel qual és important obtenir cert coneixement de conceptes tècnics relacionats amb els components elèctrics, electroquímics i electrònics que la formen.

Els components presents a la cadena de tracció han de ser disponibles al mercat, de manera que tan sols adquirint-los i realitzant el muntatge sobre el xassís es pugui disposar del vehicle.

Aquest vehicle consisteix en un quadricicle pesat per al transport de mercaderies amb caixa tancada, i ha de tenir unes característiques que permetin el seu ús dins de la mobilitat urbana i permetin el seu objectiu de transportar mercaderies en recorreguts petits, especialment el repartiment d'aquestes a l'entorn metropolità d'una ciutat moderna. És objectiu d'aquest projecte definir una sèrie de prestacions de compliment necessari per tal de que el vehicle resultant aconsegueixi l'objectiu.

L'aspecte mediambiental també té una gran importància en aquest projecte. És un objectiu d'aquest estudi trobar arribar a una solució que permeti un compromís entre prestacions i impacte ambiental.

1.2. Abast del projecte

Aquest projecte es limita a la part elèctrica de la cadena de tracció del vehicle. S'entén com a part elèctrica l'emmagatzematge d'energia i el seu processament per tal de ser transformada als motors elèctrics en energia mecànica. Queden fora d'aquest per tant la transformació de l'energia mecànica per tal de fer avançar el vehicle i l'apartat de control de la dinàmica del vehicle.

2. Descripció del conflicte

La mobilitat urbana i el seu efecte sobre el medi ambient són un tema d'actualitat a nivell mundial durant els últims temps.

Tot i què els primers vehicles elèctrics són anteriors als primers vehicles propulsats per combustibles fòssils, al llarg de la història el desenvolupament dels vehicles ha estat àmpliament lligat al motor de combustió interna.

El descobriment de la llei de Faraday i els primers avenços en la matèria dels motors elèctrics, va permetre que a mitjans de la dècada de 1830 apareguessin els primers vehicles automòbils amb tracció elèctrica. Aquests eren més aviat vehicles de demostració que vehicles amb certa utilitat, donades les limitacions de potència i autonomia que presentaven, però van servir per demostrar que la tecnologia elèctrica era un camí a seguir. Eren només els primers passos.

Al llarg dels anys, mentre la tecnologia anava evolucionant, l'alternativa elèctrica era una més de les disponibles al mercat. De fet, l'any 1900 es van vendre prop de 4200 vehicles automòbils arreu del món. D'aquests, un 40% eren impulsats per vapor, la tecnologia més usada, seguida de prop pels vehicles elèctrics, que van representar un 38%, i finalment, amb un 22% trobem els vehicles equipats amb motors de benzina [1].



Figura 2.1 Taxi elèctric a Nova York, l'any 1901. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Però posteriorment, cap a la dècada de 1920, els avenços en la tecnologia relacionats amb els motors de combustió interna, com per exemple la incorporació d'un petit motor elèctric als vehicles per tal de permetre l'arrencada del motor de combustió o la reducció de costos que va permetre la fabricació en sèrie, i juntament amb la dificultat que suposava emmagatzemar l'energia elèctrica, van decantar la balança del costat de la benzina. Cal tenir en compte a més, que a principis del segle XX no era gens estrany que certes zones relativament llunyanes a les grans ciutats no tinguessin subministrament elèctric, el que dificultava encara més l'expansió de la tecnologia.

Des de l'expansió del seu us, els automòbils han tingut una importància vital tant en el transport de viatgers com en el de mercaderies, tant en desplaçaments curts com en les llargues distàncies. Al camp o a les ciutats.

L'automòbil va a passar a ser un objecte personal que qualsevol podia tenir i utilitzar, i de gran utilitat per a la mobilitat. Però aquesta àmplia extensió no només va portar avantatges. Com s'ha comentat, els vehicles de més popularitat van acabar sent els que es movien amb combustibles fòssils, una font d'energia no renovable, que en les darreres dècades està veient cada cop més a prop l'esgotament dels recursos energètics.

Però la qüestió energètica no és l'única que apareix. Amb el pas dels anys, i en part gràcies a aquesta generalització de l'ús de l'automòbil, la contaminació atmosfèrica a les ciutats ha anat en augment. No és només a les zones urbanes on la contaminació atmosfèrica és un problema, però és probablement el lloc on més preocupa. La qualitat de l'aire afecta especialment a la qualitat de vida de les persones, i justament les grans ciutats són zones on hi fan vida fins a milions de persones, i on conviuen amb grans quantitats de vehicles.

Degut a la preocupació sobre el medi ambient, cada cop més important, durant els anys 60 del segle passat, dues de les companyies més importants de producció de vehicles, Ford i General Motors, van començar plans d'investigació i desenvolupament sobre vehicles elèctrics. Però fins a la dècada de 1990 no comencen a aparèixer prototips amb prestacions considerables i estudis de mercat per part dels fabricants dels mateixos.

En l'actualitat la majoria d'empreses de construcció de vehicles tenen una gamma de vehicles de zero emissions, i cada cop es més important el pressupost en investigació.

És especialment en la mobilitat urbana on la reaparició i el desenvolupament actual dels vehicles elèctrics té un gran potencial. Donat l'estat actual de la tecnologia, és possible obtenir bons resultats i preus molt competitius a nivell de mercat amb autonomies properes als 100km, suficients per desplaçar-se per les ciutats i les seves àrees metropolitanes. És per això que resulta de gran interès l'alternativa elèctrica en vehicles destinats a la mobilitat urbana i interurbana.

2.1. La contaminació de l'aire

Actualment la majoria de ciutats del món tenen en la contaminació atmosfèrica un dels problemes més importants. Intentar reduir-la és un dels reptes que moltes intenten afrontar cada dia.

Els principals contaminants que emeten els vehicles de combustió són diòxid de carboni, monòxid de carboni, òxids de nitrogen, components orgànics volàtils, partícules en suspensió i diòxid de sulfur.

Algunes d'aquestes substàncies són particularment tòxiques per a les persones i l'entorn, com el monòxid de carboni, que impedeix el traspàs de l'oxigen a la sang, o danya el sistema nerviós. Els òxids de nitrogen afecten tant a les persones, provocant malalties respiratòries, com a l'entorn, provocant pluja àcida. Algunes de les partícules en suspensió poden provocar càncer. El diòxid de carboni provoca l'afebliment de la capa d'ozó.

Els vehicles de diferents tipus provoquen emissions d'aquestes partícules, tal com es pot veure a la *Taula 2.1*.

Tipus de vehicle	NOx g/km	SOx g/km	CO g/km	Partícules g/km	CO2 g/km	Energia MJ/km
Benzina	0,26	0,2	2,3	0,01	209	3,16
Dièsel	0,57	0,13	0,65	0,05	154	2,36
Híbrid benzina	0,182	0,14	1,61	0,007	146,3	2,212
Pila d'hidrogen	0,04	0,01	0,02	<0,0001	87,6	1,77
Elèctric	0,17	0,06	0,08	0,0001	88,1	1,71

Taula 2.1. Emissions de contaminants de diferents tipus de vehicles. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Però les mesures més adoptades sovint són impopulars com la prohibició de circulació de determinats vehicles al centre de les ciutats en episodis d'alta contaminació, o fins i tot la prohibició total de circulació en segons quines zones.

Sembla clar que prohibir la circulació és una solució ineficient a més de poc popular. Els ciutadans tenen la necessitat de moure's per la ciutat i el transport públic actual no té prou capacitat com per absorbir la majoria de les circulacions que es fan en vehicles privats. A més, el transport públic va destinat a moure persones, però les ciutats també tenen una important mobilitat de mercaderies.

Així doncs, sembla clar que és necessari mantenir la presència d'automòbils als carrers per

tal de complir totes les necessitats de mobilitat dels ciutadans.

2.2. Els recursos energètics

L'altre principal problema a nivell mundial que presenten els vehicles de combustió interna és l'esgotament dels recursos energètics relacionats amb el petroli. El petroli és una font d'energia no renovable, i poc a poc, l'ús extensiu que se'n fa està causant un esgotament del mateix.

Però l'energia elèctrica tampoc és en si una energia renovable. Depèn del mètode per aconseguir-la. Segons dades de l'avanç sobre el sistema elèctric espanyol a l'any 2016, només un 40,9% de la demanda va ser coberta per energies renovables [2]. A la *Figura 2.2* es poden veure els percentatges concrets per a cada tipus d'energia.

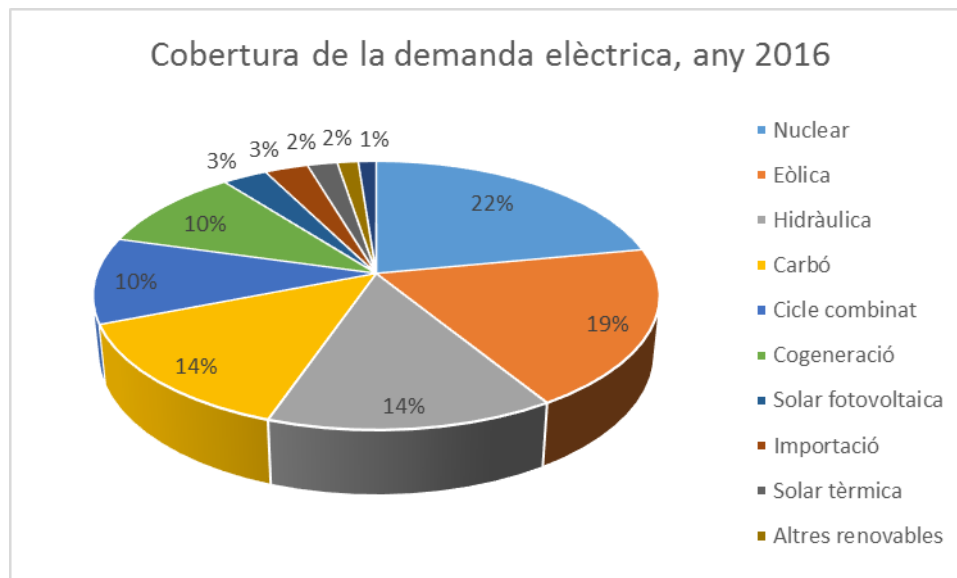


Figura 2.2 Cobertura de la demanda elèctrica l'any 2016 segons origen. Font: Red Eléctrica Española.

Els vehicles elèctrics obren la porta a un futur on la majoria de l'energia provingui de fonts renovables i netes.

3. Estudi de mercat

En els darrers anys el mercat dels vehicles elèctrics ha anat en augment de manera considerable. Les consideracions ambientals, els possibles canvis en la legislació per tal d'afavorir l'ús d'aquests, o el baix preu de l'electricitat en comparació amb la benzina o el gasoil són alguns motius pels quals molts usuaris comencen a mirar el vehicle elèctric cada cop com una alternativa més interessant.

No només el mercat de vehicles nous té una gran activitat i disposa de moltes alternatives sinó que a més, l'aparició del fenomen DIY ha impulsat a un mercat de venda de components per separat, per tal de que qualsevol pugui adaptar el seu propi vehicle de combustió i convertir-lo en elèctric.

Donades les limitacions d'autonomia en comparació amb vehicles de combustió, gran part del mercat del vehicle elèctric es centra actualment en la mobilitat urbana, i de fet, els quadricicles pesats per a mercaderies, com el que és objecte d'aquest projecte, són un mercat que inclou ja varies alternatives.

En el mercat dels vehicles de mercaderies amb caixa tancada homologats dins de la normativa europea L7e com el d'aquest projecte, es poden trobar varies alternatives amb diferents prestacions.



Figura 3.1 Comarth T-Truck Puerta corredera. Vehicle elèctric per al transport de mercaderies, categoria L7e. Font: Comarth.

A continuació s'analitzen varies d'aquestes alternatives, focalitzant en dues marques:

3.1. Comarth T-Truck Puerta corredera

El fabricant espanyol Comarth ofereix 2 alternatives de xassís i altres 2 alternatives de cadena de tracció.

En quant a alternatives de xassís, totes dues tenen idèntica càrrega màxima, de 635kg, però un d'ells té una caixa amb volum de 2300l, i la versió més gran té una caixa amb volum de 3100l. Aquesta diferència de volum s'aconsegueix allargant la batalla, de 1535mm a 1935mm. Les altres dimensions del vehicle són idèntiques en ambdues versions de bastidor. La massa màxima autoritzada per totes dues versions de xassís és de 1460kg.

En quant a les versions de cadena de tracció, s'ofereixen dos motors de corrent continu i excitació independent, un amb tensió nominal de 48V i potència nominal de 5,4kW i un altre amb tensió nominal de 72V i potència nominal de 8,5kW. Els parells màxims són, respectivament, de 60Nm i 80Nm a 0rpm, i pel que respecta a velocitats màximes, es situen a 45km/h i 60km/h respectivament. El motor va muntat en disposició transversal i a l'eix posterior en tots dos casos.

En matèria de bateries novament s'ofereixen dues alternatives, una de Plom-Àcid i una d'Ió-Liti (LiFePO4) opcional. Les bateries de Plom-Àcid de sèrie consisteixen en 4 agrupacions de cel·les amb tensió nominal 12V cadascuna i capacitat 190Ah pel motor de 48V, i 6 agrupacions de cel·les novament amb tensió nominal 12V cadascuna però una capacitat de 150Ah pel motor de 72V. Els temps de càrrega són de 5h i 6h respectivament, per donar una autonomia d'aproximadament 50km en tots dos casos.

Pel que fa a les bateries d'Ió-Liti opcionals, són bateries de 9,6kWh pel motor de 48V, i una capacitat de 200Ah. Pel motor de 72V l'energia disponible és de 14,6kWh, també amb una capacitat de 200Ah. Els temps de càrrega són de 4,5h per a càrrega completa i l'autonomia d'aproximadament 120km.

L'alimentació del carregador es fa a 220V de corrent altern monofàsic, amb una intensitat màxima de 16A i una potència del carregador de 2200W.

A continuació es mostra la Taula 3.1 amb les dades ja exposades:

Variant	48V (Plom)	48V (Liti**)	72V (Plom)	72V (Liti**)
Nombre de cel·les	4	-	6	-
Capacitat [Ah]	190	200	150	200
Temps de càrrega [h]	5	4,5	6	4,5
Autonomia* [km]	50	120	50	120
Tensió nominal [V]	48		72	
Potència nominal [kW]	5,4		8,5	
Velocitat màxima [km/h]	45		60	
Parell màxim [Nm]	60		80	
Càrrega útil [kg]	635			
MMA [kg]	1460			
Pneumàtics	165/70R13			

Taula 3.1. Característiques tècniques del Comarth T-Truck Puerta corredera.
Font: Comarth.

*: En funció de temperatura, pes, desnivell, conducció...

** : Les bateries d'Ió-Liti són opcionals.

3.2. Alkè ATX210E:

El fabricant italià Alkè ofereix un quadricicle pesat per a mercaderies, l'anomenat ATX210E, de sèrie amb una plataforma oberta a l'espai de càrrega però amb una caixa tancada de portes corredores igual que el Comarth anterior. A diferència de Comarth, Alkè només ofereix una cadena de tracció amb una potència nominal de 8kW per l'ATX210E. El motor elèctric és de corrent altern amb una tensió nominal de 48V i ofereix una força de tracció màxima de 2800N a l'eix posterior.

La massa en condicions de circulació, amb bateries i conductor és de 965kg, i una capacitat de càrrega màxima de 505kg.

Pel que fa a les bateries, s'ofereixen dues opcions, bateria de Plom-Àcid i bateria de Gel. Les característiques de cada tipus de bateria s'exposen a la Taula 3.2:

Bateria	Plom-Àcid	Gel
Nombre de cel·les	8	8
Tensió nominal per cel·la [V]	6	6
Capacitat [Ah]	210	180
Vida útil [cicles]	1200	700
Autonomia màxima [km]	75	60
Temps de recàrrega estimat [h]	9	7,5

Taula 3.2. Característiques tècniques de les bateries de l'Alkè ATX210E. Font: Alkè.

El carregador s'alimenta a 230V de corrent altern, a 50Hz o 60Hz, amb una intensitat màxima de 16A.

3.3. Alkè ATX230E:

El mateix fabricant del vehicle anterior, produeix també el quadricicle pesat ATX230E, de gamma major a l'alternativa anterior. Novament es comercialitza amb una plataforma oberta de sèrie, però ofereixen la possibilitat de canviar-la per una caixa tancada amb portes corredores.

Les característiques de la cadena de tracció de l'ATX230E són similars a les de l'ATX210E. Amb una potència nominal de 8kW, i fins a 14kW de potència de pic, permet una velocitat de fins a 35km/h. La força màxima és de 6500N, aplicada sobre l'eix posterior. El motor és de corrent altern i treballa a 48V de tensió nominal.

La massa en buit, només amb el conductor i les bateries és 1035kg com a màxim, en funció de la bateria instal·lada. Per aquesta versió, la càrrega màxima disponible és de 850kg.

Quant a les bateries, Alkè ofereix 4 tipus de bateries per l'ATX230E. Una versió de Plom-Àcid, una de Gel i dues diferents d'Ió-Liti. Les característiques de cadascuna de les versions de la bateria es mostren a la Taula 3.3:

Bateria	Plom-Àcid	Gel	Ió-Liti (10kWh)	Ió-Liti (20kWh)
Nombre de cel·les	8	8	-	-
Tensió nominal per cel·la [V]	6	6	48*	48*
Capacitat [Ah]	210	180	210	420
Vida útil [cicles]	1200	700	2000	2000
Autonomia màxima [km]	75	60	80	150
Temps de recàrrega estimat [h]	8	11	3,5	6,5
Temps de recàrrega ràpida [h]	-	-	1,5	2,6
Massa del vehicle** [kg]	1035	1035	895	975

Taula 3.3. Característiques tècniques de les bateries de l'Alkè ATX230E. Font: Alkè.

*: Tensió nominal de tota la bateria.

**: Amb el conductor i bateries.

El carregador de bateries té les mateixes condicions que el de l'ATX210E, treballa a 230V de corrent altern a 50Hz o 60Hz i amb un corrent màxim de 16A.

3.4. Resum d'alternatives

Finalment, per comparar les tres opcions, a continuació es presenta a la Taula 3.4 un resum de totes tres alternatives. Per resumir, es tria només una versió de cadascun, la que es podria considerar versió de més prestacions. Pel Comarth T-Truck es considera la versió de 72V amb bateries d'Ió-Liti, per l'Alkè ATX210E s'opta per la versió amb bateries de Plom-Àcid i per l'Alkè ATX230E es tria l'opció amb bateries d'Ió-Liti de 200kWh.

Vehicle	Comarth T-Truck (72V Liti)	Alkè ATX210E (Plom-Àcid)	Alkè ATX230E (Ió-Liti 200kWh)
Potència nominal [kW]	8,5	8	8
Tensió nominal [V]	72	48	48
Velocitat màxima [km/h]	60	44	35
Nombre de cel·les	-	8	-
Capacitat [Ah]	200	210	420
Temps de càrrega [h]	4,5	9	6,5
Temps càrrega ràpida [h]	-	-	2,6
Autonomia* [km]	120	75	150
Càrrega útil [kg]	635	505	850
MMA [kg]	1460	1470	1845
Pneumàtics	165/70R13	175/65 R14	175/70 R14

Taula 3.4. Resum de les alternatives presentades.

4. La cadena de tracció

La cadena de tracció és l'encarregada de convertir l'energia emmagatzemada en l'energia mecànica del moviment del vehicle. En el cas dels vehicles elèctrics, l'energia s'emmagatzema en forma d'energia química dins de la bateria. La cadena de tracció inclou des de la bateria fins a les rodes, les encarregades de transmetre les forces a terra per tal de moure el vehicle.

Així doncs, l'energia química passa a energia elèctrica gràcies a les reaccions que es donen a les bateries. Aquesta energia elèctrica passa de les bateries al motor, però per tal d'adaptar el corrent elèctric a les demandes del motor, cal passar per un pas intermedi corresponent als convertidors electrònics de potència.

Un cop al motor, l'energia elèctrica es transforma en energia mecànica, en forma de rotació de l'eix. Però generalment els motors elèctrics treballen a velocitats molt elevades, per tal de realitzar menys parell i permetre que les mides d'aquest siguin més petites. Aquestes condicions de velocitat i parell fan necessària la utilització d'una reducció.

A diferència dels motors de conducció interna, les característiques d'entrega de potència dels motors elèctrics fan que siguin innecessàries més d'una relació d'engranatges, pel que es pot prescindir de la caixa de canvis i simplement implementar una sola reductora de relació fixa.

4.1. Esquemes d'implementació

Un cop a la sortida de la reductora, l'energia pot anar directament a la roda o no en funció de l'esquema propi de la cadena de tracció. La utilització de motors elèctrics permet una certa flexibilitat alhora de muntar físicament la cadena de tracció.

L'esquema natural de transmissió deriva dels motors de combustió interna, substituint aquest pel motor elèctric. Eliminada la necessitat de l'embragatge donada la capacitat de realitzar parell a velocitat nul·la dels motors elèctrics, i convertida la caixa de canvis en una reductora de relació fixa, l'esquema és el mateix que el de qualsevol vehicle amb motor de combustió, l'energia mecànica passa al diferencial, que permet el gir de les rodes a diferent velocitat pel cas de trobar-se el vehicle realitzant un revolt, i del diferencial passa a les rodes.

Però donada la flexibilitat dels motors elèctrics, apareixen altres possibles esquemes d'implementació de la cadena de tracció. L'únic motor es pot substituir per dos motors de la

meitat de la potència total del vehicle. Cadascun d'aquests motors té una reductora pròpia i va directament connectat a cada roda de l'eix motriu. La funció del diferencial passa doncs de ser realitzada pel control de potència de cadascun dels motors.

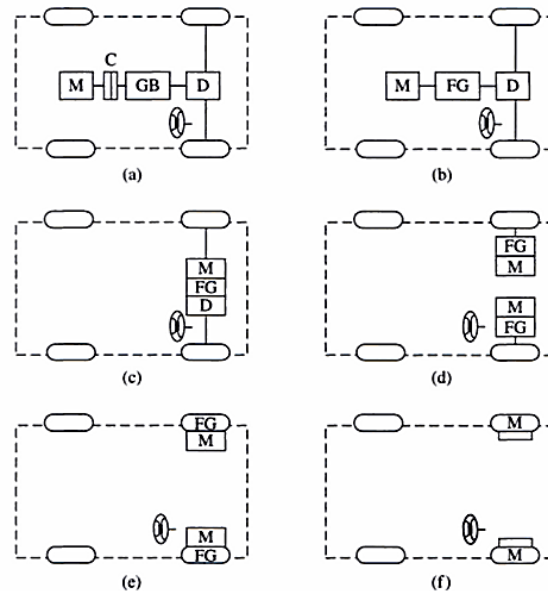


Figura 4.1 Esquemes d'implementació de la cadena de tracció per a un vehicle elèctric. Font: *Modern electric vehicle technology*, C. C. Chan i K. T. Chau.

M: Motor.

GB: Caixa de canvis.

D: Diferencial.

C: Embragatge.

FG: Reductora fixa.

A més dels esquemes que es poden veure a la *Figura 4.1*, altres esquemes són possibles en funció de la quantitat de rodes motrius del vehicle. En un automòbil de tracció total, cadascuna de les rodes pot tenir un motor elèctric connectat, de la mateixa manera que es pot tenir un sol motor i una transmissió cap a les quatre rodes com en el cas d'un vehicle amb motor de combustió.

A més dels elements comentats, també formen part del vehicle altres elements electrònics destinats al control de la cadena de tracció, com per exemple la gestió de les cel·les de la bateria o el control del motor.

5. Motors elèctrics

Es tracta del component més important de la cadena de tracció en quant a la seva funció, que és la de transformar energia elèctrica en energia mecànica. L'evolució tecnològica ha portat a tenir molts tipus de motors elèctrics. En aquest apartat es presenten els tipus més habituals de motor elèctric que són utilitzats en la indústria del vehicle elèctric.

Cal comentar que els motors elèctrics, a diferencia dels motors de combustió, funcionen de manera reversible, en el que s'anomena funcionament en els quatre quadrants. Això permet frenar mitjançant el propi motor i regenerar energia, és l'anomenada frenada regenerativa. Aquest funcionament és molt important donat que permet estendre lleugerament l'autonomia i aprofitar millor l'energia emmagatzemada, a més d'augmentar l'eficiència del vehicle.

5.1. Motor de corrent contínua

És un dels motors més primitius, però alhora un dels més estesos per a tot tipus d'aplicacions, i per a diferents potències. El seu principi de funcionament és molt bàsic, consistent en tenir un corrent circulant per una espira, que fa que en el centre d'aquesta s'indueixi un camp magnètic. En cas de tenir dues bobines, una fixa al terra (estator) i l'altre amb una rotació permesa (rotor), creant camps magnètics alhora, la posició relativa d'un camp magnètic respecte a l'altre farà que es generi una força sobre la que té rotació per tal d'alinejar tots dos camps.

Així doncs neix el concepte del motor de corrent contínua, amb l'únic problema d'aconseguir que els dos camps magnètics no arribin mai a estar alineats. Per tal de solucionar aquest problema, s'afegeixen les escombretes i el col·lector de delgues, un mecanisme que fa que les bobines del rotor rebin la corrent en el sentit necessari en cada posició.

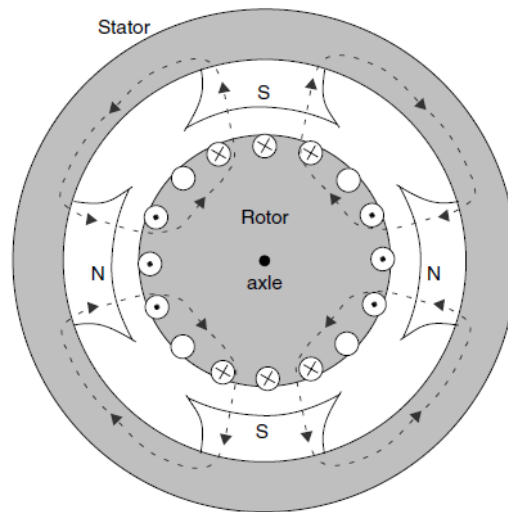


Figura 5.1 Esquema d'un motor elèctric de corrent continu. Els símbols al rotor indiquen el sentit de la intensitat a cada fil de coure de les bobines. Els cables indicats amb una creu tenen corrent entrant al full, els indicats amb punt tenen corrent sortint, i els que no tenen cap indicació no tenen pas de corrent. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Podem trobar diferents tipus de motors de corrent contínua en funció de la forma que tenen per crear el camp magnètic de l'estator. Bàsicament trobem dos grans grups, els d'estator bobinat i els d'imant permanent. Dintre del grup d'estator bobinat trobem els motors d'excitació independent, excitació sèrie, i excitació paral·lel.

Aquests motors tenen com a principal avantatge la facilitat del control i la gran experiència que es té en el disseny i funcionament. Però el sistema d'escombretes i el col·lector de delgues generalment creen problemes, especialment pel desgast dels mateixos per culpa de les espurnes que salten en la commutació. Per aquest motiu el manteniment d'aquest tipus de motors és generalment car i han quedat en desús per aplicacions de gran potència.

5.2. Motor Brushless

L'aparició, i amb força, de l'electrònica de potència ha permès controlar els motors de corrent continua de manera molt més simple, però addicionalment permet també buscar alternatives a aquest. Com s'ha comentat, les escombretes i el col·lector de delgues són peces amb un alt desgast mecànic, el que provoca que el manteniment dels motors de

corrent contínua sigui car.

Una de les opcions per tal de trobar alternatives de cara al motor DC és fer que el camp magnètic rotatiu sigui el creat per l'estator, i per tant el camp magnètic del rotor podrà ser constant, i creat per un imant permanent. D'aquí apareix el concepte de funcionament dels motors Brushless.

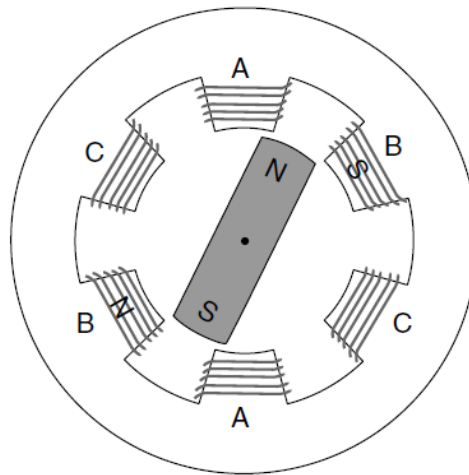


Figura 5.2 Esquema d'un motor elèctric brushless. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

El corrent que circula per les bobines de l'estator ha de tenir forma sinusoïdal i amb freqüència variable. Aquest corrent variable, combinat en tres bobines per les quals hi circula un corrent idèntic però desfasat 120° , aconsegueix crear un camp magnètic rotatiu que gira amb una velocitat proporcional a la freqüència del corrent. El camp magnètic del rotor s'intenta alinear amb el de l'estator i gira a la mateixa velocitat que el de l'estator. D'aquí la importància de que el valor de la freqüència sigui variable, doncs aquest valor serà el que determini la velocitat a la que gira el motor.

5.3. Motor de reluctància variable

El principi de funcionament d'aquest tipus de motor és molt semblant al dels motors Brushless, però en aquest cas, el rotor no conté un imant permanent sinó un material magnètic. El principi de funcionament juga en aquest cas amb la dificultat del camp magnètic a creuar la separació d'aire entre el rotor i l'estator. Aquesta dificultat farà que el rotor tendeixi a alinear les parts amb menor separació amb el camp magnètic generat per una bobina a l'estator. Per això cal que el rotor tingui una forma semblant a la d'una roda dentada, on la distància entre el rotor i l'estator és diferent segons la posició.

En assolir-se la distància mínima cal que el corrent de la bobina desaparegui per tal de deixar girar el rotor cap a una posició on, en tornar a aparèixer el corrent, tornarà a crear força sobre ell. Novament ens trobem amb la idoneïtat dels corrents alterns.

Per tal de suavitzar la forma en la que crea parell el motor, cal tenir més d'una bobina a l'estator, pel qual la forma de l'estator és semblant a la dels motors Brushless, amb varies bobines en diferents angles. Usualment el nombre de sortints del rotor on la distància és mínima és dues unitats menys que el de bobines a l'estator.

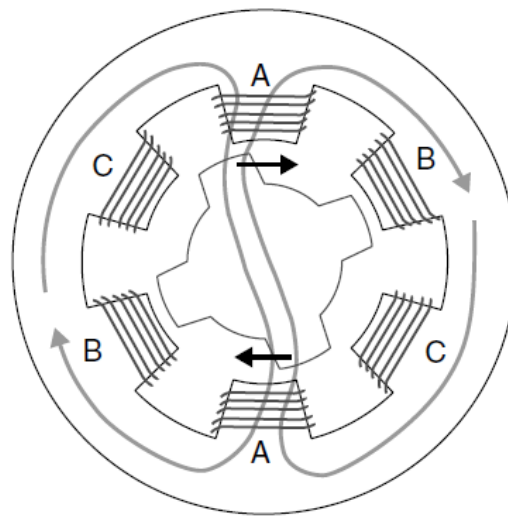


Figura 5.3 Esquema de funcionament d'un motor elèctric de reluctància variable.

Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

La irregularitat en el parell fa que aquests motors tinguin fama de sorollosos, en comparació a altres tipus de motors elèctrics. Però el motor de reluctància variable té certs avantatges, la inexistència de força contraelectromotriu pel fet de no tenir camp magnètic al rotor fa que les velocitats siguin més altes que en altres tipus de motor. També el fet de ser simples tant de disseny com de fabricació fa que sigui un motor amb preus raonablement baixos. És un motor interessant per aplicacions com compressors radials.

5.4. Motor d'inducció

Una altra tecnologia molt utilitzada és el motor d'inducció. En aquest cas, es mantenen les bobines de l'estator, alimentades també amb corrent sinusoidal de freqüència variable, i també les bobines al rotor, però aquestes es curtcircuiten.

Novament, les bobines de l'estator, al estar alimentades per un corrent sinusoidal trifàsic,

generen un camp magnètic rotatiu en el temps. L'objectiu de curtcircuitar les bobines del rotor és permetre que l'acció del camp magnètic rotatiu de l'estator generi un corrent a les mateixes. Aquest corrent genera un camp magnètic, que s'intenta alinear amb el generat per l'estator, però no ho aconsegueix mai, donat que en el moment en el que tots dos camps s'apropen, el camp del rotor es debilita fins al punt que en el cas ideal d'alinear-se, desapareix.

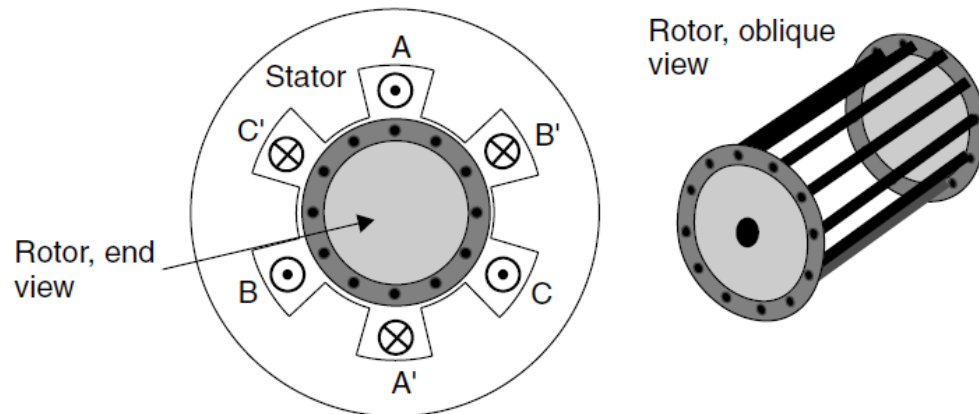


Figura 5.4 Esquema d'un motor elèctric d'inducció, amb vista de detall sobre el rotor. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Aquesta diferència de velocitats fa que el control de la velocitat es compliqui mínimament, doncs en aquesta ocasió, la velocitat de rotació del motor no és directament proporcional a la freqüència d'alimentació, però aquesta diferència és petita i no crea problemes.

El parell que és capaç de realitzar el motor per tant és depenent de la diferència de velocitat entre el camp magnètic del rotor i el del estator, definida com a lliscament. El control d'aquest lliscament pot ésser també interessant, donat que existeix un lliscament on el parell és màxim.

El fet d'haver-se d'induir un corrent a les espirs del rotor provoca que el rendiment del mateix sigui lleugerament inferior al dels motors Brushless, al voltant d'un 2%.

6. Bateries

Si bé el motor elèctric és la part més important de la cadena de tracció, les bateries són també un component clau i de fet no és menys important que el motor. Es tracta del component que emmagatzema l'energia que serà utilitzada per moure el vehicle, per aquest motiu la seva capacitat és clau per determinar l'autonomia del mateix. Alhora es tracta d'un component que sovint sol ser voluminós i acostuma a tenir una massa important, pel que és important també en la dinàmica del vehicle.

La tecnologia de les bateries està en constant evolució gràcies a la extensa utilització dels dispositius elèctrics de tot tipus avui en dia. Les diferents tecnologies permeten implementar una bateria amb característiques similars de capacitat i voltatge però amb diferents pesos, volums i preus. Per aquesta raó es clau escollir bé el tipus de tecnologia amb la que implementar-la.

Les bateries estan formades de cel·les on s'emmagatzema energia química, a partir de la qual s'aconsegueix energia elèctrica. Varies d'aquestes cel·les es poden agrupar en sèrie per tal de formar un mòdul. La connexió de mòduls en sèrie i/o paral·lel permet formar bateries amb les característiques de voltatge i energia desitjades per tal d'alimentar el sistema elèctric en les condicions desitjades.

L'energia emmagatzemada dins de cada cel·la és la diferencia d'energia lliure entre l'estat carregat i l'estat descarregat. Aquesta energia química disponible es transforma en energia elèctrica a demanda. La transformació d'energia es duu a terme en els components bàsics d'una cel·la, que són els següents:

1. Elèctrode positiu: És fet d'un component capaç de reduir-se durant la descàrrega de la cel·la. Aquest elèctrode consumeix electrons del circuit extern durant la descàrrega. Un exemple del material d'aquest elèctrode és l'Òxid de Plom (PbO_2), sempre en estat sòlid.
2. Elèctrode negatiu: És fet d'un metall o d'una aleació capaç d'oxidar-se durant la descàrrega. Aquest elèctrode allibera electrons al circuit extern durant la descàrrega. Materials com Plom (Pb) o Cadmi (Cd) són útils per construir aquest elèctrode, i també es troba sempre en estat sòlid dins de la cel·la.
3. Electròlit: L'electròlit és el medi que permet conducció iònica entre els elèctrodes d'una cel·la. L'electròlit ha de tenir alta i selectiva conducció pels ions que formen part de les reaccions als elèctrodes, però alhora no ha de

ser conductor d'electrons per tal d'evitar una descàrrega pròpia a les bateries. Sovint l'electròlit és un líquid, gel o sòlid. En funció del tipus de la bateria, l'electròlit és un àcid o alcalí. Les bateries més clàssiques com les de Plom-Àcid, contenen una solució aquosa d'àcid sulfúric ($\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$), però bateries més avançades com les d'Ió-Liti, contenen electròlits en forma de gel, pasta o resina.

4. Separador: El separador és una capa material d'aïllament elèctric, que separa físicament elèctrodes de polaritats oposades. Els separadors han de ser permeables als ions d'electròlit i alhora pot tenir la funció d'immobilitzar o emmagatzemar l'electròlit. Avui en dia, els separadors solen estar fets de polímers sintètics.

Durant la operació de la bateria, es formen reaccions químiques en cadascun dels elèctrodes sempre que el circuit entre borns de la cel·la estigui tancat. El subministrament d'electrons al circuit es deu a les reaccions que es formen a la superfície dels elèctrodes, conegudes com a reaccions de reducció-oxidació (redox). En el procés de funcionament de la bateria, l'elèctrode positiu es redueix i absorbeix electrons del circuit, mentre l'elèctrode negatiu s'oxida i lliura electrons al circuit extern. Les reaccions que tenen lloc durant la càrrega de la bateria són exactament les contràries, mentre una font proveeix el circuit d'electrons, l'elèctrode positiu s'oxida i lliura electrons i l'elèctrode negatiu es redueix i absorbeix electrons.

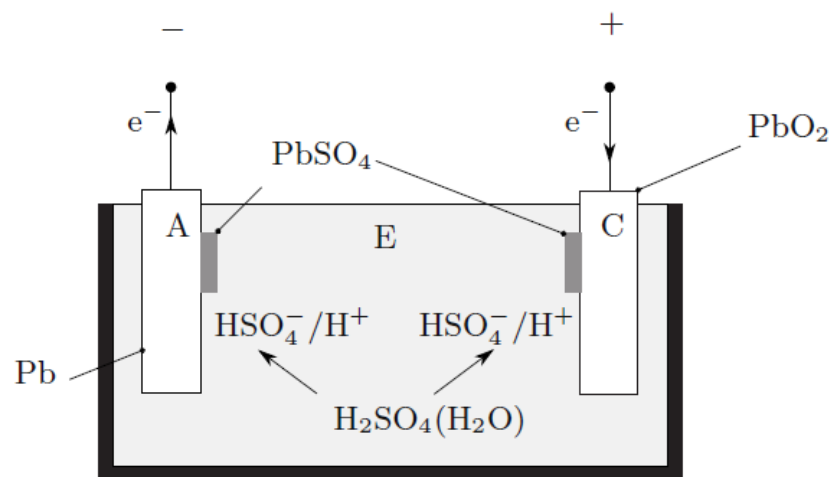


Figura 6.1 Esquema d'una bateria de Plom-Àcid. Font: *Vehicle Propulsion Systems*, Guzzella L.

Abans d'entrar en matèria, és important definir les següents propietats:

- a. **Voltatge nominal:** Cada cel·la té un valor nominal del voltatge que hi ha entre els seus borns quan està treballant. Aquest valor no és exactament el real en condicions de treball, doncs la caiguda de tensió real depèn de la intensitat que circula i de la resistència interna, però és un bon paràmetre per tal d'aproximar i fer els càlculs. El corrent no és l'única variable que té el voltatge d'una cel·la, també ho són altres com l'estat de càrrega o la temperatura.
- b. **Capacitat de càrrega:** Definida en ampers multiplicat per hores, unitat fora del sistema internacional, és el paràmetre més important d'una bateria. És la capacitat de proveir el sistema de corrent que té durant un determinat temps. Per exemple, una bateria de 10Ah és capaç de donar 10 Ampers durant una hora. De fet, la capacitat no és un valor concret, depèn de la velocitat de descàrrega de la bateria. Aquesta dependència és especialment notable en bateries de Plom-Àcid, però no només en aquesta tecnologia es dona aquest efecte, degut a reaccions internes no desitjades.
- c. **Energia emmagatzemada:** El propòsit d'una bateria és emmagatzemar energia. Aquesta energia ve donada pel voltatge i la càrrega, de fet, és el producte entre aquestes dues propietats. Per tal de treballar amb amper-hora com a unitat de càrrega, es defineix el watt-hora com a unitat de l'energia emmagatzemada, equivalent a 3600 Joules.
- d. **Energia específica:** Es defineix com la quantitat d'energia per unitat de massa de la bateria. És especialment útil per conèixer el pes d'una bateria a partir dels requeriments d'energia, i poder comparar entre diverses tecnologies.
- e. **Densitat d'energia:** Es defineix com la quantitat d'energia emmagatzemada per unitat de volum. Igual que l'anterior, és útil durant el disseny per tal de conèixer el volum de la bateria en funció de la energia requerida.
- f. **Estat de càrrega:** Es defineix l'estat de càrrega d'una bateria com la quantitat de càrrega que roman disponible a la mateixa en un moment donat de la utilització, partint de l'estat de càrrega total. Sovint es representa com un percentatge de la càrrega total. En cas de tenir la bateria en descàrrega, l'estat de càrrega va progressivament reduint-se, i en el cas contrari, de tenir la bateria carregant-se, l'estat de càrrega augmenta progressivament.

Com s'ha comentat anteriorment, la construcció es basa en agrupar cel·les en paral·lel i en sèrie. L'agrupament en sèrie de cel·les permet definir el voltatge total de la bateria, mentre que l'agrupament en paral·lel de cel·les o de grups d'aquestes en sèrie permet definir la capacitat total de la bateria, seguint una relació molt simple, com si de resistències es tractés.

És important en aquesta construcció que cada cel·la tingui les mateixes característiques, han de ser del mateix fabricant i preferiblement del mateix lot, i és de gran importància que totes les cel·les es carreguin i descarreguin alhora. Això és degut a que una cel·la amb diferent voltatge o càrrega nominal pot limitar el voltatge o la càrrega de tota la bateria.

També és important que l'estat de càrrega de les diferents cel·les sigui el mateix en tot moment. En tenir cel·les, o agrupacions, en paral·lel és important que la caiguda de voltatge en ambdues sigui el mateix. En cas contrari, una cel·la carregaria l'altra fins a arribar al mateix voltatge i de nou a l'equilibri. Si aquesta càrrega es fes de manera descontrolada, la bateria es podria arribar a danyar o fins i tot destruir. És comprensible doncs que la seguretat al voltant de les bateries sigui un tema molt important i calgui preparar correctament l'entorn on treballen.

6.1. Tecnologies disponibles

A l'actualitat existeixen una gran quantitat de tecnologies per tal d'implementar bateries recarregables. Moltes d'elles es troben comercialment disponibles i són útils per a aplicacions en vehicles elèctrics. Alguns avenços en matèria tecnològica dels últims anys han permès arribar a obtenir bateries que són recarregables mecànicament, tals com les de alumini-aire o zinc-aire.

En més de 150 anys de desenvolupament tècnic, i amb multitud de combinacions utilitzades, encara no s'ha trobat cap tecnologia que permeti l'ús generalitzat dels vehicles elèctrics. Però tot i això, els avenços dels darrers temps mostren un futur prometedor.

Combinacions que actualment s'utilitzen hi ha moltes, començant per les clàssiques bateries recarregables de cotxe de Plom-Àcid, passant per Níquel-Cadmi, Níquel-Hidrur Metàlic, Polímer-Liti o Ió-Liti.

Tecnologia	Wh/kg	Wh/l	Cicles de vida	Relació de cost*
Pb-Acid	<40	100	600	1
Ni-MH	60	130	1500	3-4
Li-Ion (alta potencia)	>150	350	1200	>5
Li-Ion (alta energia)	100	250	1200	>5
Li-MP	120	140	n.d.	n.d.
Li-air	>1000	n.d.	n.d.	n.d.

Taula 6.1. Comparació de tecnologies. Font: Vehicle Propulsion Systems, Guzzella.

*:Respecte a Pb-Acid.

n.d.=no disponible.

La tecnologia més utilitzada en aplicacions de vehicles elèctrics és, actualment, la combinació Ió-Liti. Com es pot veure a la Taula 6.1, és l'opció amb millors prestacions de les disponibles, tot i el cost elevat respecte d'altres.

6.2. Bateries d'Ió-Liti

La bateria d'Ió-Liti apareix a principi de la dècada de 1990, a partir del descobriment als anys 70 de que el liti es pot intercalar a les estructures cristal·lines de Cobalt o Níquel per formar LiCoO_2 o LiNiO_2 . Aquests compostos, conjuntament amb d'altres formats amb Manganès (LiMn_2O_4 o LiMnO_2), o amb Fosfat de Ferro (LiFePO_4) són bones eleccions per l'elèctrode positiu, i poden entregar prestacions bones i constants amb preus raonablement baixos. L'elèctrode negatiu és format habitualment per grafit combinat amb liti (LiC_6), i l'electròlit sol ser una solució líquida orgànica o un polímer sòlid.

Durant l'operació de descàrrega, ions de Liti són lliurats per l'elèctrode negatiu i viatgen per l'electròlit fins a l'elèctrode positiu, on ràpidament són incorporats. Aquest procés és fàcilment reversible.

El voltatge nominal d'una cel·la d'Ió-Liti és de 3,6V, equivalent a tres cel·les de Ni-Cd o Ni-MH connectades en sèrie. Les bateries d'Ió-Liti tenen gran energia específica, gran potència específica, gran eficiència energètica, bones prestacions a altes temperatures i baixa capacitat d'auto-descàrrega. També són reciclables. Aquestes característiques les fan una opció ideal per a aplicacions com vehicles elèctrics o híbrids [1].

El major inconvenient que presenten és la gran sensibilitat a variacions en el voltatge, pel

que és important controlar-ho durant la càrrega i descàrrega. Un sobrevoltatge durant la càrrega pot ocasionar una descomposició exotèrmica del material actiu degut a l'oxidació dissolvent, danyant greument la bateria. Pel contrari, un voltatge excessivament baix durant la càrrega pot portar a que la bateria estigui insuficientment carregada. En el cas de la descàrrega, un sobrevoltatge en la bateria pot portar a un dany greu en la bateria, probablement acompanyat d'una ignició de la mateixa. Convé per tant tenir controlada cadascuna de les cel·les durant el seu funcionament, per tal d'evitar greus incidències, danys irreversibles per a la bateria i danys materials o personals als usuaris.

6.3. Seguretat i bateries

Anteriorment s'ha comentat la importància de l'estabilitat en la càrrega i descàrrega d'una bateria, així com l'operació en rangs de seguretat per tal d'evitar danys i accidents. La seguretat és un tema de gran importància en a l'indústria de l'automòbil en diferents aspectes. Davant la proliferació del vehicle elèctric, és important mantenir els estàndards de seguretat actuals, reduir riscos en la utilització del vehicle per part dels ocupants i dels anomenats usuaris externs, aquells que no es troben dins el vehicle però es poden veure afectats per un accident.

De cara a l'operació segura de les bateries, és important tenir un sistema electrònic que controli diferents paràmetres mesurats sobre cada cel·la mitjançant sensors i realitzi les accions de control necessàries per tal de disminuir el risc i evitar incidències. En apartats posteriors s'explicarà el funcionament d'aquest component electrònic, anomenat sistema de gestió de bateries, BMS.

Adicionalment, i donat que un dels paràmetres de gran importància per a la seguretat en una bateria és la temperatura, cal col·locar-la dins del vehicle en un lloc adequat, amb condicions de ventilació suficients. De cara a la situació de les bateries al vehicle, també cal tenir en compte que és important aïllar la bateria de possibles impactes, i alhora protegir als ocupants d'una possible incidència, elèctrica o química.

6.4. Mètodes alternatius d'emmagatzemament d'energia

A més de les clàssiques bateries, existeixen altres mètodes capaços d'emmagatzemar energia per tal d'utilitzar-la posteriorment. En general la majoria d'aquests sistemes són útils aplicats en vehicles per l'aprofitament d'energia regenerada en les frenades en vehicles híbrids, però també poden ser aplicats a vehicles elèctrics. A continuació s'exposen dos d'aquests sistemes:

6.4.1. Ultracapacitors

Els ultracapacitors i supercapacitors són derivats dels condensadors clàssics. La densitat energètica d'aquests augmenta en comparació amb els condensadors, a costa de perdre densitat de potència, pel que actuen més amb característiques de bateria que de condensador. Però tot i aquesta pèrdua de densitat de potència, aquesta segueix sent superior als valors habituals de les bateries convencionals, pel que aquests ultracapacitors són essencialment útils en casos on es requereix una potència elevada durant curts terminis de temps.

Es distingeixen dos tipus d'ultracapacitors, els simètrics i els asimètrics. En els primers no hi intervé cap procés electroquímic i el procés que es produeix és completament no-faradaic. Estan fabricats per dos elèctrodes de carboni polaritzables idèntics, amb una disposició simètrica. Els ultracapacitors asimètrics (habitualment anomenats també supercapacitors) tenen un principi de funcionament semblant al d'una cel·la de bateria, i impliquen una reacció química on tenen lloc processos faradaics i no-faradaics. Aquest tipus d'ultracapacitors permeten una major densitat energètica.

6.4.2. Volants d'inèrcia

El volant d'inèrcia és un dispositiu que permet emmagatzemar energia en forma d'energia cinètica. Per tal d'aconseguir-ho es fa girar una gran massa amb forma de disc al voltant del seu eix, transmetent una certa energia cinètica, que correspon a la següent fórmula:

$$U = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad \text{Equació 6.1}$$

On:

U : Energia emmagatzemada al volant d'inèrcia.

J : Moment d'inèrcia del disc.

ω : Velocitat angular del volant d'inèrcia.

Com es desprèn de l'Equació 6.1, per tal d'emmagatzemar més energia cal augmentar la velocitat, que té relació quadràtica amb l'energia total. Per raons de seguretat és important que la velocitat angular no excedeixi un cert valor, per tal d'evitar tensions excessives al material del volant d'inèrcia

que pugui causar un trencament a altes velocitats i el perill que comportaria. Els valors de potència específica que es poden aconseguir són de l'ordre de 2kW/kg, tot i que teòricament es podria arribar fins als 5-10kW/kg.

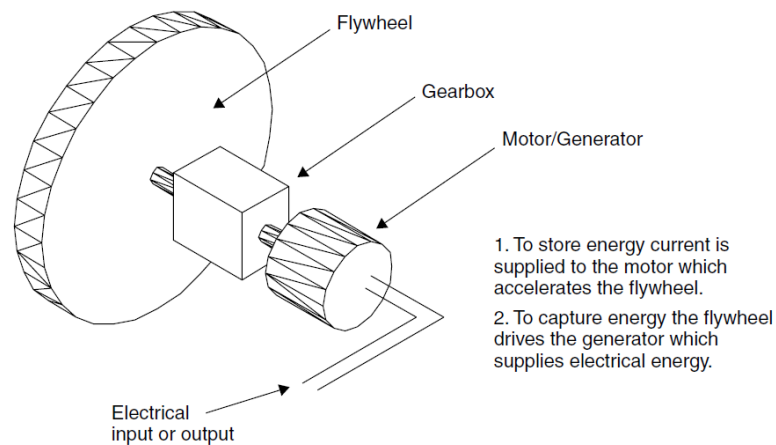


Figura 6.2 Esquema d'un volant d'inèrcia. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Aquesta forma d'emmagatzematge té una llarga història en la seva aplicació a vehicles. De fet, qualsevol motor de combustió interna té un volant d'inèrcia per tal de fer la seva entrega de potència de forma molt més suau que en cas de no tenir-la. Addicionalment tenen aplicació en vehicles híbrids per tal d'emmagatzemar potència, o en vehicles elèctrics en substitució de les bateries o com a suport d'aquestes.

7. Components electrònics

Els circuits d'electrònica de potència serveixen per convertir energia elèctrica d'un nivell de voltatge i freqüència a uns altres per tal d'alimentar una càrrega.

Les bases de l'electrònica de potència apareixen amb el desenvolupament dels semiconductors. Una aplicació dels materials semiconductors és fabricar elements que actuen com a interruptors controlats electrònicament, que permeten canviar la configuració d'un circuit de potència. Aquests elements es troben comercialment disponibles des dels anys 70, i han evolucionat fortament amb el pas dels anys. Actualment és possible trobar elements capaços de treballar amb magnituds de l'ordre dels centenars de volts o ampers, empaquetats en un sol element.

Els elements de control de potència es connecten en un circuit de manera que permeti diferents configuracions en funció de si els elements actuen com a interruptors oberts o tancats. Aquests circuits es coneixen com a circuits convertidors de potència, i sovint contenen alguns elements capaços d'emmagatzemar energia, com inductàncies i condensadors. S'evita l'ús de resistències per tal d'estalviar pèrdues energètiques, però les resistències paràsites dels elements i connectors són inevitables. Aquests convertidors processen la potència en funció de senyals procedents d'una unitat de control.

Quatre tipus bàsics de circuits de conversió de potència són:

1. Convertidors CC/CC: Converteixen corrent continu d'un nivell de voltatge a un altre.
2. Convertidors CC/CA: Converteixen voltatge de corrent continu a voltatge de corrent altern. Aquest corrent altern pot tenir forma d'ona quadrada o forma d'ona sinusoïdal, composta a partir de modulació per polsos del tipus PWM.
3. Convertidors CA/CC: Rectifiquen un voltatge de corrent altern en un corrent continu.
4. Convertidors CA/CA: Converteixen voltatge de corrent altern amb un cert nivell i freqüència directament en un altre nivell i freqüència. Són els anomenats cicloconvertidors.

7.1. Tecnologies disponibles

Per tal d'implementar aquests interruptors controlats, existeixen diferents tecnologies basades en materials semiconductors. Diferents dispositius, basats en tecnologies i efectes diferents. A continuació s'exposen alguns que acostumen a ser utilitzats en sistemes de

tracció:

7.1.1. Díodes

Un díode és un dispositiu que actua com a interruptor no controlat, que canvia de comportament en funció del que li imposa el circuit.

Té dos terminals: El positiu, anomenat ànode, i el negatiu, anomenat càtode. Un voltatge ànode-càtode positiu permet la conducció de corrent, mentre que una caiguda de tensió negativa impedeix el corrent elèctric a través del mateix. A partir d'una caiguda de tensió negativa de gran magnitud, es produeix el fenomen anomenat "ruptura" i el díode passa a conduir molt ràpidament.

7.1.2. BJT de potència

Un BJT és un dispositiu de tipus transistor amb tres terminals que permet controlar la conducció entre els terminals positius (anomenat Col·lector) i negatiu (anomenat Emissor). El terminal de control s'anomena Base.

La forma de controlar el dispositiu és mitjançant el corrent que entra per la Base. Quan aquest sobrepassa un valor establert, el transistor permet la conducció a través del Col·lector cap a l'Emissor, amb una lleugera caiguda de tensió, anomenada tensió de saturació. El valor del corrent que entra per la Base determina el corrent que entra pel Col·lector de manera que hi ha proporcionalitat entre els dos valors. Per tal de tallar la conducció, cal eliminar el corrent de la Base, i el transistor deixarà de conduir.

7.1.3. MOSFET de potència

El MOSFET és un transistor basat en l'efecte camp, diferent al BJT. Novament el dispositiu té tres terminals, ara anomenats Porta (terminal de control), Drenador (terminal positiu) i Font (terminal negatiu).

El funcionament del mateix és semblant al del BTJ, però en aquest cas, el senyal de control és la caiguda de tensió entre la Porta i la Font. El corrent que travessa el dispositiu és per tant proporcional a aquesta caiguda de tensió.

El principal avantatge del MOSFET de potència respecte del BJT és que és capaç de treballar a velocitats de commutació més grans, i per tant admet freqüències de treball més altes que els BTJ.

7.1.4. IGBT

L'IGBT és una combinació entre les bones característiques conductores del BJT de potència i les bones característiques de control dels MOSFET de potència.

Molt present en les aplicacions del control de potència a la tracció, permet obtenir grans resultats gràcies a les baixes pèrdues similars a les dels BJT i l'alta impedància d'entrada similar al MOSFET.

7.2. BMS

Com s'ha comentat, la bateria d'un vehicle elèctric està formada per cel·les electroquímiques individuals connectades entre sí en sèrie per tal de produir la caiguda de tensió necessària i alhora diferents agrupacions en sèrie iguals agrupades en paral·lel per augmentar la capacitat total.

Addicionalment, la bateria conté una sèrie de components electrònics per tal de gestionar alguns paràmetres de funcionament de les cel·les de la bateria. La funció bàsica d'aquests components electrònics és assegurar que les cel·les funcionen en el rang d'operació segura. Aquesta operació ajuda a allargar la vida útil del conjunt. Els components electrònics reben el nom de BMS, les sigles en anglès de Battery Management System.

Aquest mètode de control és igualment aplicable als ultracapacitors.

El BMS controla l'estat de les bateries mitjançant un algoritme basat en mesurar el voltatge, corrent i temperatura de les cel·les, per tal de calcular amb ells paràmetres de funcionament i els límits de càrrega i descàrrega possibles al moment determinat. El BMS també és responsable d'igualar la càrrega de les cel·les i d'assegurar la fiabilitat i la protecció de la bateria davant de les sobrecàrregues, sobredescàrregues, curtcircuits o condicions tèrmiques extremes.

El BMS ha de controlar tots o alguns dels paràmetres següents:

1. L'estat de càrrega de la bateria
2. L'estat de salut de la bateria
3. Temperatura de les cel·les
4. Potència de càrrega i descàrrega
5. Equilibri de cel·les

6. Escriptura de dades

7.3. Carregador de bateria

La bateria ha de poder carregar-se des de l'exterior en els períodes de descans del vehicle. L'energia elèctrica procedent de la xarxa en forma de corrent altern sinusoïdal amb una freqüència de 50Hz a Europa, cal que sigui modificada a les condicions de corrent necessàries per la bateria, generalment corrent contínua. Per tal de realitzar aquesta conversió s'utilitza un convertidor CA/CC, també anomenat rectificador.

7.3.1. Convertidors CA/CC

Els convertidors de corrent altern a corrent continu realitzen la seva funció mitjançant elements electrònics que funcionen com a interruptors controlats o no.

El model més simple de convertidor CA/CC és l'anomenat Rectificador de mitja ona, on amb un sol díode s'aconsegueix passar d'un corrent sinusoïdal monofàsic a un corrent continu aprofitant només els intervals positius de l'ona sinusoïdal. Models més complexos permeten aprofitar tots dos intervals o fins i tot només una part d'aquests intervals, gràcies als interruptors controlats.

Existeixen diferents tipologies segons si els interruptors són controlats o no, segons si el rectificat de l'ona és complet o no, segons si es rectifica un corrent trifàsic o monofàsic, i segons si es té un aïllament galvànic de protecció o no.

Per tal d'aconseguir un corrent continu sense distorsions causades per la rectificació, els convertidors d'aquest tipus inclouen un filtre format per una inductància i un condensador. Aquest filtre està dissenyat per obtenir un corrent continu de valor constant.

7.3.2. Procés de càrrega

El procés de càrrega de bateries es divideix en diferents fases amb diferents corrents aplicades, pensades en el funcionament químic de les bateries per tal de minimitzar el dany i allargar la vida útil de les mateixes.

La primera fase, anomenada fase de càrrega a granel, consisteix en recarregar la gran part de la capacitat utilitzada durant la descàrrega amb un corrent constant de màxim valor

possible. Posteriorment, els darrers percentatges de l'estat de càrrega es recarreguen mitjançant la fase de càrrega d'absorció, on el corrent es redueix per tal d'evitar danys sobre les cel·les. La tercera fase és l'anomenada fase d'equalització, on mitjançant corrents reduïdes es completa i s'igual a la càrrega de totes les cel·les. Finalment, la fase de càrrega flotant s'inicia amb la bateria completament carregada i serveix per compensar les pèrdues que ocasiona la descàrrega pròpia de les cel·les amb el temps.

7.3.3. Tipus i modes de càrrega

El tipus de càrrega depèn de la potència que és capaç de subministrar el carregador al vehicle. Les dades de cadascun es recullen a la Taula 7.1:

Tipus de càrrega	Durada aproximada	Intervals de potència	Modes
Normal	Entre 9 i 5 hores	<3,7kW	1, 2, 3
Semi ràpida	1 o 2 hores	>3,7kW i <22kW	3
Ràpida	25 minuts	>22kW	3,4

Taula 7.1. Característiques dels tipus de càrrega. Font: Institut Català de l'Energia, GENCAT.

En quant a modes de càrrega, existeixen 4 en funció de la forma d'energia elèctrica que prenen de la xarxa [3]:

1. Mode 1: Recàrrega utilitzant una base de presa de corrent d'ús general i no exclusiu per a la càrrega de vehicles elèctrics. Sense comunicació entre l'estació de recàrrega i el vehicle.
2. Mode 2: Recàrrega utilitzant una base de presa de corrent d'ús general i no exclusiu per a la càrrega de vehicles elèctrics, amb protecció i control inclosos en la caixa de control del cable de recàrrega. Poca comunicació entre l'estació de recàrrega i el vehicle.
3. Mode 3: Recàrrega utilitzant una base de presa de corrent especialment dissenyada per a la recàrrega del vehicle elèctric. Aquest mode utilitza sempre una estació de recàrrega o un sistema d'alimentació específic per al vehicle elèctric. Les funcions de control i protecció són a l'estació de recàrrega. Alta comunicació entre estació i vehicle.
4. Mode 4: Estació de recàrrega per a ús exclusiu del vehicle elèctric. Amb carregador de bateries a l'estació de recàrrega i un subministrament amb corrent continu d'elevada potència. Aquest mode utilitza sempre una estació de recàrrega o un

sistema d'alimentació específic per al vehicle elèctric. Alt nivell de comunicació entre estació i el vehicle elèctric.

Pels modes 1 i 2, el connector és una presa de corrent tipus UNE 20315-1-2 o UNE 20315-2-11, les habituals per a ús domèstic. La tensió màxima és de 250V monofàsica i el corrent màxim és de 16A. És per tant una solució que ofereix poca potència, però la comoditat de poder instal·lar el carregador en qualsevol lloc o local.

Pel mode 3 existeixen tres tipus en funció del connector a utilitzar. Es presenten a la Taula 7.2:

Presa de corrent	Tipus 1	Tipus 2	Tipus 3
Tensió màxima	250V Monofàsic	250V Monofàsic 500V Trifàsic	250V Monofàsic 500V Trifàsic
Intensitat màxima	32A Monofàsic	70A Monofàsic 63A Trifàsic	32A Monofàsic 32A Trifàsic
Potència màxima	7,3kW	43kW	22kW

Taula 7.2. Característiques de les preses de corrent del mode 3. Font: Institut Català de l'Energia, GENCAT.

El mode 4 també té diferents tipus de connectors en funció del fabricant. Les estacions de recàrrega del mode 4 han de tenir obligatòriament al menys 2 connectors del tipus Combo 2. A la Taula 7.3 es presenten els tres tipus de connector normalitzats segons la UNE-EN 62196-3.

Model de connector	CCS Combo 2	CHAdeMO	Tesla
Tensió màxima	480Vcc	500Vcc	600Vcc
Intensitat màxima	200A	125A	225A

Taula 7.3. Característiques dels connectors del mode 4. Font: Institut Català de l'Energia, GENCAT.

7.3.4. Xarxa de carregadors

En l'actualitat la xarxa de carregadors públics de vehicles elèctrics de Catalunya consta de gairebé 300 estacions, repartides en les 4 províncies, però especialment a la de Barcelona, que en té 250. Només al municipi de Barcelona n'hi ha al voltant de 170 [4].

El número d'estacions de càrrega separades pel tipus, disponibles al desembre de 2015 es mostra a la Taula 7.4. Cal tenir en compte que algunes estacions tenen diferents tipus de càrrega instal·lats.

Tipus de càrrega	Catalunya	Província de Barcelona	Barcelona
Normal	260	227	144
Semi ràpida	27	24	10
Ràpida	18	17	13
Total	285	251	163

Taula 7.4. Número d'estacions de càrrega en funció del tipus. Font: Institut Català de l'Energia, GENCAT.

7.4. Convertidor de potència principal

Per tal de convertir el corrent continu que és capaç de proveir la bateria al tipus de corrent necessari per controlar la potència del motor elèctric, és necessari un dispositiu electrònic adequat.

En funció del tipus de motor instal·lat en el vehicle es necessita un convertidor amb característiques i funcionament diferents. Això és degut a que cada tipologia de motor té un control de la potència diferent. A continuació s'explica els dos grans tipus de convertidors útils per aquesta funció i els motors als que serveixen.

7.4.1. Convertidors CC/CC

Els convertidors de corrent continu a corrent continu serveixen per variar el nivell de tensió entre l'entrada i la sortida. Existeixen diferents arquitectures bàsiques segons si serveixen per reduir la tensió o elevar-la. En aquest projecte parlarem només de convertidors reductors de tensió, que són els més habituals en aplicacions de vehicles elèctrics.

El funcionament d'aquests convertidors és molt simple, consisteixen en treballar en intervals de temps molt reduïts, i dins de cadascun d'aquests intervals, l'interruptor controlat treballa una part del mateix en conducció i l'altra no condueix. Els percentatges de temps obert i tancat depenen de la relació entre les tensions d'entrada i la sortida, tal com es mostra a l'Equació 7.1. Els intervals de temps en els quals treballa el convertidor depenen de la capacitat de canviar d'estat dels interruptors controlats, i per tant de la tecnologia amb la que s'implementen.

$$D = \frac{V_K}{V_F} = \frac{T_{ON}}{T_S}$$

Equació 7.1

On cada terme és:

D : Relació de conducció.

V_K : Caiguda de tensió en borns de sortida.

V_F : Caiguda de tensió en borns d'entrada.

T_{ON} : Temps amb l'interruptor en conducció.

T_S : Interval de temps de funcionament.

Per tal d'aconseguir un corrent de sortida tan constant com sigui possible, s'equipa un filtre basat en una inductància i un condensador. Existeixen arquitectures de convertidor que inclouen aïllament galvànic per tal de protegir i separar els circuits d'entrada i de sortida.

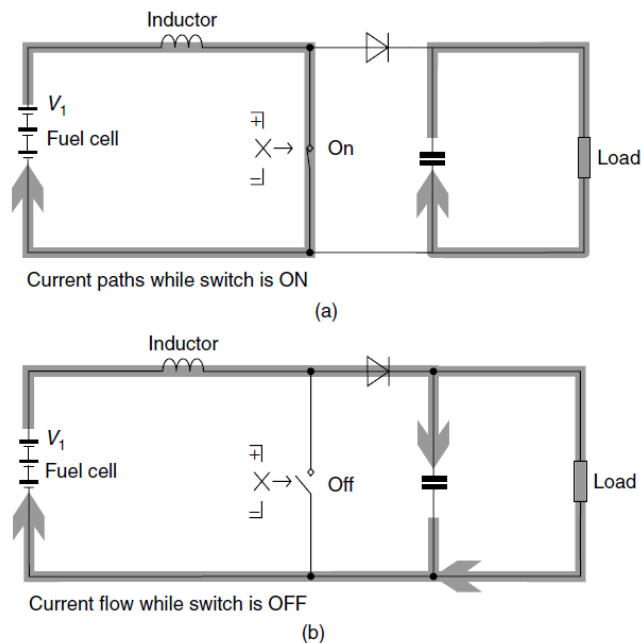


Figura 7.1 Esquema d'un convertidor de corrent continu del tipus reductor de tensió. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Aquests convertidors serveixen per controlar els motors de corrent continu, entre d'altres aplicacions. El control es realitza a través de la caiguda de tensió entre borns del motor, modificant la relació de conducció segons les necessitats.

7.4.2. Convertidors CC/CA

Els convertidors de corrent continu a corrent altern treballen convertint un corrent constant procedent d'una font en un corrent sinusoïdal o amb una forma semblant a la sinusoide. De manera similar als convertidors de corrent continu a corrent continu, fan servir interruptors controlats per tal de crear una forma d'ona semblant a la funció sinus a partir del corrent continu.

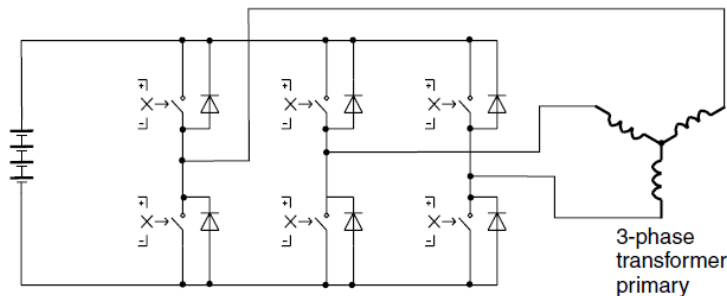


Figura 7.2 Esquema d'un convertidor de corrent continu a corrent altern. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Existeixen diferents estratègies de control dels interruptors per tal d'aconseguir bones aproximacions al senyal sinusoïdal. La més utilitzada és el Pulse Width Modulation, conegut per les sigles PWM, que permet un bon control amb un contingut en harmònics baix. El PWM fa servir un senyal modulador sinusoïdal de la freqüència desitjada i un senyal portador triangular de la freqüència de commutació dels dispositius.

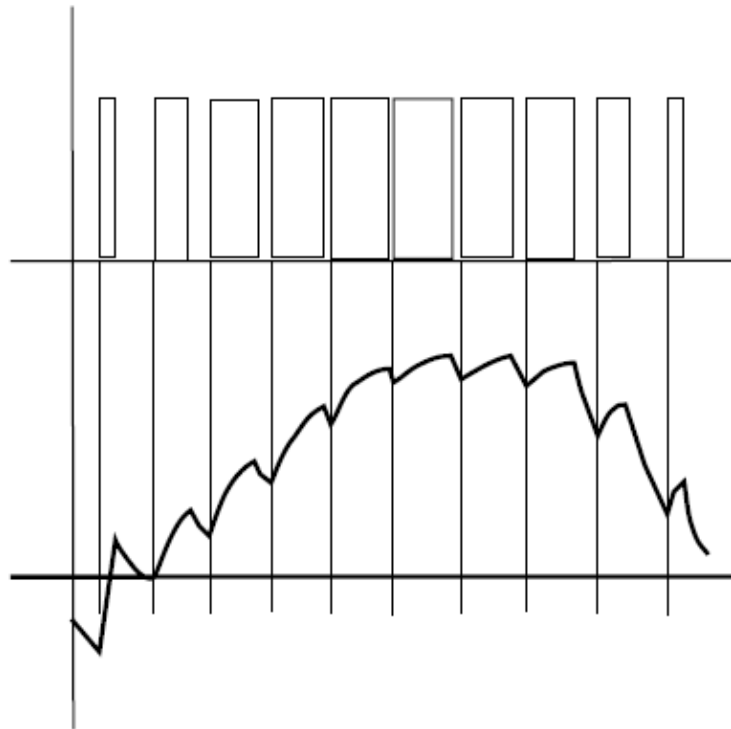


Figura 7.3 Gràfic típic de la forma del voltatge a la sortida d'un convertidor cc/ca controlat per PWM. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Aquest tipus de convertidors serveixen per controlar motors de corrent altern. Tant els motors síncrons com els d'inducció es controlen mitjançant la freqüència del corrent altern, per tant els convertidors amb control per PWM varien la freqüència del senyal modulador en funció de la desitjada per controlar el motor.

7.5. Convertidor secundari

Però un vehicle no només és el motor que el fa moure, existeixen d'altres serveis auxiliars que també funcionen amb energia elèctrica, alguns són tècnicament imprescindibles com el sistema de control o el sistema de refrigeració dels equips, i d'altres són accessoris per facilitar la conducció a l'usuari com la climatització, la direcció assistida, la ràdio, els llums, l'eixugaparabrises i d'altres possibles accessoris.

Aquests components funcionen a un voltatge de corrent continu fix, generalment el mateix per a tots els components, habitualment 12Vcc. Pel que fa a disseny de la cadena de tracció, cal tenir en compte que els components necessiten d'un convertidor CC/CC propi.

De cara a les consideracions energètiques, cal tenir en compte que aquests components consumeixen part de l'energia que surt de la bateria, pel que cal considerar com a màxim 2kW de potència consumits. El consum de potència depèn bàsicament de l'ús dels equipaments que tingui el vehicle. Equipaments com la climatització consumeixen una gran quantitat d'energia quan l'usuari els té en funcionament.

En el cas del vehicle que és objecte del projecte, no es preveu la incorporació de climatitzador. Amb bombetes de baix consum, de tipus LED, es poden aconseguir consums molt reduïts, entorn als 150W.

8. Prestacions

8.1. Modelització

Per tal de poder caracteritzar la dinàmica del vehicle, cal fer un balanç de potències sobre el cotxe. En aquest balanç cal tenir en compte les potències següents:

- a. Potència realitzada pel motor. Cal tenir en compte que en la unió entre el motor i les rodes caldrà posar-hi una reducció de velocitat, donades les altes velocitats nominals dels motors elèctrics. Aquesta reducció tindrà un cert rendiment que caldrà tenir en compte per tal d'obtenir la potència aprofitable.
- b. Potència consumida per la força aerodinàmica. El fregament entre l'aire i un cos amb velocitat relativa a aquest produeix una força que s'oposa al moviment. Aquesta força depèn tant de la velocitat relativa entre l'aire i el cos, com d'algunes propietats d'ambdós.
- c. Potència consumida per la fricció pel rodament. Les rodes són un element flexible. Això provoca que la força de contacte no sigui, de fet, una sola força sinó una distribució de pressions a tota l'àrea de contacte. Quan el vehicle es troba aturat, la resultant d'aquesta distribució passa pel centre de la roda, però quan el vehicle es troba en moviment, la flexió del pneumàtic provoca que aquesta resultant es descentri i crea moment. Aquest moment és semblant al que apliquen els frens d'un vehicle i per tant s'oposa al moviment.
- d. Potència consumida pel pes al pujar una rampa. Sovint el terreny pel que circula un vehicle no és pla, té pujades i baixades. En aquestes situacions on la velocitat del vehicle i l'acció de la gravetat no són normals entre si, el pes realitza treball i per tant consumeix una potència.
- e. Potència consumida per les forces d'inèrcia. En accelerar o desaccelerar un vehicle es consumeix una potència deguda a les forces d'inèrcia.

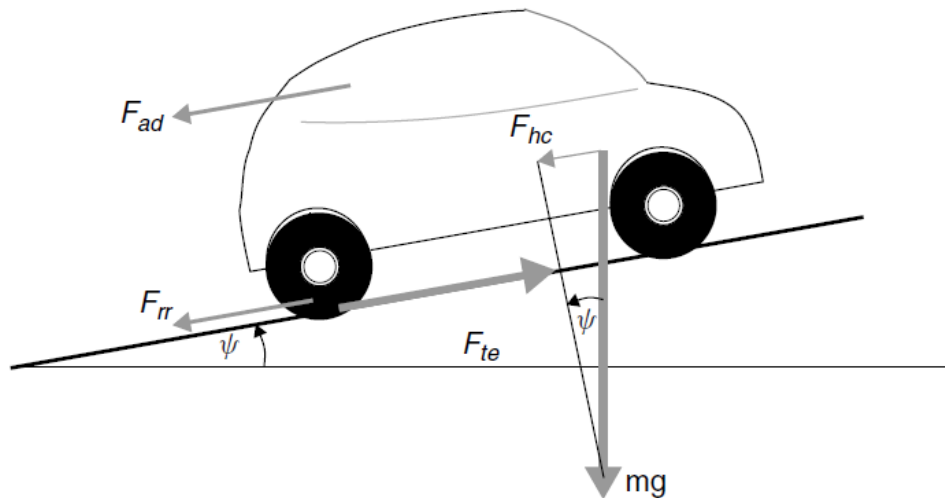


Figura 8.1: Forces que actuen sobre un vehicle en moviment. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

L'equació que les relaciona és la següent:

$$P_m = P_a + P_r + P_g + P_i$$

Equació 8.1

On cada terme és:

P_m : Potència aprofitable del motor.

P_a : Potència consumida per la força aerodinàmica.

P_r : Potència consumida per la resistència al rodament.

P_g : Potència consumida al pujar una rampa.

P_i : Potència consumida per les forces d'inèrcia.

Totes elles expressades en Watts.

Un cop descrites les potències que entren en joc, cal caracteritzar-les per tal de poder realitzar els càlculs convenients.

8.1.1. Potència aprofitable del motor:

La potència aprofitable del motor és la potència mecànica que arriba a les rodes del vehicle procedent del motor.

El motor té una certa potència nominal, aquella que és capaç de mantenir de manera contínua en servei.

Com s'ha comentat anteriorment, els motor elèctrics tenen velocitats nominals molt elevades i alhora el problema de ser capaços de generar molt poc parell. Per tal d'ajustar la velocitat nominal a la necessària i d'augmentar el parell efectiu, cal disposar d'una reductora entre l'eix de sortida del motor i l'eix de les rodes. Aquesta reductora té un cert rendiment.

Per tant, la potència es caracteritza com:

$$P_m = P_n \eta_t \quad \text{Equació 8.2}$$

On:

P_n és la potència nominal del motor [W].

η_t és el rendiment de la transmissió.

8.1.2. Potència consumida per la fricció aerodinàmica:

La resistència aerodinàmica d'un vehicle és provocada bàsicament per dos fenòmens. Per una banda, tenim la fricció viscosa de l'aire de l'entorn contra la superfície del vehicle, però també cal tenir en compte la diferència de pressions entre la part frontal i posterior del cotxe, provocada per la separació del flux d'aire.

Per a formes idealitzades d'un vehicle, i a partir de mètodes numèrics, és possible aproximar un camp de pressions i arribar a calcular la força resultant. Però la forma d'un vehicle no és idealitzada, doncs s'ha de tenir en compte diferents efectes particulars (ventilació del motor, turbulència causada per l'allotjament de les rodes, influència del vent lateral) que són difícils de calcular però determinables experimentalment.

S'estima que prop d'un 65% de la resistència aerodinàmica d'un turisme és deguda a la pròpia forma del cos del cotxe, la turbulència generada per l'allotjament de les rodes causa un 20%, els retrovisors, allotjament de les finestres, antenes i d'altres causen un 15%, i la ventilació del motor, un 5%.

Per a facilitar els càlculs, sovint es simplifica el vehicle a un prisma, amb una certa àrea frontal que, multiplicada pel coeficient de fricció aerodinàmica, permeten calcular el valor de la força.

L'expressió per a calcular el valor de la potència és doncs:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A_f c_d (v_v - v_a)^3 \quad \text{Equació 8.3}$$

Amb els següents paràmetres:

ρ_a : Densitat de l'aire ambient [kg/m³].

A_f : Àrea frontal del vehicle [m²].

c_d : Coeficient de fricció aerodinàmica.

v_v : Velocitat del vehicle [m/s].

v_a : Velocitat de l'aire [m/s].

Cal tenir en compte que per a calcular l'àrea frontal del vehicle hem d'assimilar la forma frontal del cotxe a la d'un quadrat. Per aquest motiu es considera un cert factor de forma, que bàsicament té en compte la quantitat d'espai frontal que ocupa el vehicle respecte l'àrea d'un rectangle de dimensions idèntiques a l'alçada i l'amplada del vehicle, com veiem a la figura.

Així doncs, l'expressió per calcular l'àrea frontal és la següent:

$$A_f = h \cdot a \cdot f_f \quad \text{Equació 8.4}$$

Amb:

h : Alçada màxima del vehicle respecte al terra [m].

a : Amplada màxima del vehicle [m].

f_f : Factor de forma.

8.1.3. Potència consumida per la resistència al rodolament:

L'elasticitat dels pneumàtics ocasiona que el contacte amb el terra no sigui puntual sinó que es creï tota una distribució de pressions en una àrea de contacte. Amb velocitat nul·la, la força resultant d'aquesta distribució passa exactament pel centre de la roda, però amb el vehicle circulant amb certa velocitat, la resultant queda per davant del centre de la roda, amb el que es crea un moment que s'oposa al moviment de la mateixa.

Per tal de caracteritzar la força, es defineix un cert coeficient de fricció per rodolament, el qual no és constant i, de fet, depèn de multitud de variables, com la velocitat, la pressió del pneumàtic o l'estat de la superfície sobre la que roda el vehicle.

Per exemple, la pressió del pneumàtic té una influència aproximadament proporcional a $1/\sqrt{p}$, d'aquí l'interès a evitar portar pressions baixes a les rodes. L'efecte de la pluja amb la superfície mullada pot arribar a augmentar un 20% el valor del coeficient, mentre que paviments desfavorables, com la sorra, poden arribar a doblar el valor. La velocitat té poca influència a velocitats baixes, però a velocitats més elevades, properes a una velocitat crítica on el fenomen de ressonància comença a aparèixer, pot fer créixer el valor del coeficient.

A la figura es pot observar el comportament del coeficient del valor en diferents condicions de velocitat, pressió i temperatura.

A la pràctica, i per facilitar càlculs, es pot considerar que el valor del coeficient de fricció per rodolament és constant, i generalment ve especificat pel fabricant de pneumàtics en les condicions de funcionament.

Així doncs, es considera la següent expressió per a calcular el valor:

$$P_r = f_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos(\alpha) v_v$$

Equació 8.5

Amb:

f_r : Coeficient de fricció per rodolament.

m_v : Massa total del vehicle [kg].

g : Valor de l'acceleració de la gravetat [m/s²].

α : Angle d'inclinació del terreny respecte de la vertical [rad].

v_v : Velocitat del vehicle [m/s].

8.1.4. Potència consumida en pujar una rampa:

Quan el vehicle circula per un terreny que no és horitzontal, cal tenir en compte que el propi pes del vehicle s'oposa al moviment en cas ascendent, o l'afavoreix en cas descendent.

L'expressió de la potència és:

$$P_g = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) v_v$$

Equació 8.6

On cada terme és:

m_v : Massa total del vehicle [kg].

g : Valor de l'acceleració de la gravetat [m/s²].

α : Angle d'inclinació del terreny respecte de la vertical [rad].

v_v : Velocitat del vehicle [m/s].

8.1.5. Potència consumida per les forces d'inèrcia:

L'acceleració o desacceleració d'un cos provoca una força fictícia anomenada força d'inèrcia. Addicionalment, la rotació dels cossos interiors al propi cotxe també genera forces d'inèrcia. La majoria d'aquests cossos que roten formen part de la transmissió.

Per tal de facilitar els càlculs, s'acostuma a incloure la inèrcia d'aquests cossos rotatius en el valor de la massa del vehicle.

En el desenvolupament d'aquest projecte, i davant la dificultat de calcular les inèrcies, es considera que l'efecte d'aquests cossos no afecta a les prestacions del vehicle, pel que es consideren negligibles les inèrcies dels mateixos.

Per tant, considerant aquesta simplificació, el valor de la potència es calcula amb la següent expressió:

$$P_i = m_v \cdot a_v \cdot v_v \quad \text{Equació 8.7}$$

On:

m_v : Massa total del vehicle [kg].

a_v : Acceleració instantània del vehicle [m/s²].

v_v : Velocitat del vehicle [m/s].

8.2. Càlcul de prestacions:

El model definit en l'apartat anterior és d'especial importància per tal de poder calcular les prestacions d'un vehicle.

Les prestacions permeten determinar el comportament dinàmic més bàsic del vehicle a partir dels paràmetres físics del mateix. Alguns d'aquests paràmetres físics venen donats pel propi disseny, com serien les propietats aerodinàmiques de la carrosseria. D'altres venen imposats per les condicions d'us, com la massa total, tenint en compte que depèn de la càrrega que porti durant el servei. I finalment, alguns paràmetres es poden definir en l'àmbit d'aquest projecte, com són la potència nominal del motor o la massa en buit del vehicle.

Adicionalment, durant el càlcul de la massa en buit, és important tenir en compte l'autonomia del vehicle. Una part important de la massa d'un vehicle elèctric consisteix en les bateries. Per tant, és important determinar l'autonomia necessària pel vehicle estudiat en aquest projecte, donat que influirà també en les prestacions del mateix.

Els tres tipus de prestacions més importants que habitualment són objecte d'estudi són:

- a. Velocitat màxima del vehicle.
- b. Pendent màxima de servei.

c. Acceleració màxima.

Durant aquest apartat, es descriurà la forma d'estudiar cadascuna d'aquestes a partir del model descrit a l'apartat anterior.

8.2.1. Velocitat màxima del vehicle.

Per a certs vehicles per passatgers d'altres prestacions, el valor de la velocitat màxima és simplement un tema publicitari, doncs legalment es veuran limitats a la velocitat màxima de la carretera. Però en casos de vehicles de càrrega o de potència inferior, pot ésser important tenir en compte la velocitat màxima per comprovar que les prestacions del vehicle seran suficients per oferir el servei.

En el cas del vehicle objecte d'aquest projecte, per normativa d'homologació, la velocitat màxima no haurà de ser superior a 90km/h, però addicionalment es vol comprovar que el vehicle sigui capaç d'assolir la velocitat màxima en vies urbanes (50km/h) en condicions de servei.

Per tal de fer els càlculs, es consideren les següents aproximacions:

- a. Velocitat del vent nul·la.
- b. La velocitat màxima del vehicle es calcularà en terreny pla, per tal d'evitar la influència que la pendent tingui sobre el valor.
- c. Es considerarà que el vehicle ja no accelera ni frena.

Per tant, i substituint les equacions 8.2, 8.3, 8.5, 8.6 i 8.7 a la general, obtenim la següent:

$$P_n \cdot \eta_t = \frac{1}{2} \rho_a \cdot A_f \cdot C_d \cdot v_v^3 + f_r \cdot m_v \cdot g \cdot v_v \quad \text{Equació 8.8}$$

D'on, aïllant v_v , obtenim el valor de la velocitat màxima assolible pel vehicle.

8.2.2. Pendent màxim de servei.

En vehicles industrials per a transport de mercaderies, una prestació realment important és el pendent màxim pel qual poden circular a una certa velocitat mínima que permeti realitzar

el servei en unes condicions determinades.

Per tal d'alleugerir els càlculs, s'assumeix que el vehicle circula sense accelerar ni frenar, i que la velocitat mitja del vent és nul·la.

Per tant, l'equació que permet obtenir el valor del pendent és la següent:

$$P_n \cdot \eta_t = \frac{1}{2} \rho_a \cdot A_f \cdot C_d \cdot v_{v,\min}^3 + f_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos(\alpha_{\max}) v_{v,\min} + m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha_{\max}) v_{v,\min} \quad \text{Equació 8.9}$$

D'on s'obté un angle, α_{\max} , en radians. Per obtenir el valor de pendent percentatge, només cal substituir a l'Equació 10.10:

$$p_{\max} = 100 \cdot \tan(\alpha_{\max}) \quad \text{Equació 8.10}$$

Amb p_{\max} [%] pendent màxim que pot assolir el vehicle a $v = v_{v,\min}$.

8.2.3. Acceleració màxima.

Un paràmetre de gran utilitat per quantificar la maniobrabilitat d'un vehicle és l'acceleració màxima.

Es disposa de moltes mètriques per mesurar aquesta prestació, la més utilitzada sol ser el temps que triga el vehicle en accelerar fins als 100km/h partint del repòs.

Donat que la normativa d'homologació no permet superar els 90km/h, es decideix prescindir d'aquest indicador, i al tractar-se d'un vehicle de càrrega, es considera que la importància que tindria en aspectes de publicitat seria reduïda.

9. Dimensionament de la bateria

9.1. Autonomia.

Com ja s'ha comentat anteriorment, l'autonomia del vehicle és d'essencial importància per dos motius bàsics.

Per un costat, l'autonomia defineix el temps d'utilització i influeix en la decisió del client final d'una forma notable. En el cas d'aquest projecte, si el client final és una empresa de repartiment, influirà en el nombre de vehicles que necessiti per tal de completar totes les trameses d'un dia sense problemes. Si el client final és un particular o una empresa que només necessiti transportar material d'un lloc a un altre, segurament buscarà el vehicle al mercat amb major autonomia per tal de poder realitzar tot el transport sense haver de recarregar la bateria pel camí.

Per altra banda, l'autonomia afecta a les dimensions de la bateria, i per tant al seu pes. Les tecnologies actuals han suposat un gran avenç en termes d'espai i pes, però encara queda molt camí per recórrer en aquest aspecte, per tant, la massa de la bateria és important i cal tenir-la en compte perquè afecta a les prestacions del vehicle.

La forma de calcular l'autonomia d'un vehicle és complexa, es disposa de dos tipus bàsics de càlcul:

D'una forma bàsica, es pot considerar un càlcul amb el vehicle circulant a velocitat constant. Fàcilment es pot imaginar que les simplificacions que cal assumir fan que els resultats siguin poc fiables de cara a comparar amb el comportament real. Però sovint és útil per comparar entre diferents vehicles, donat que les regles per realitzar el test són clares i no deixen lloc a ambigüitats.

Per tal d'obtenir resultats més fidels a la realitat, cal fer servir el comportament dinàmic real del cotxe. Per aconseguir-ho cal conduir o simular la conducció d'un vehicle, circulant amb velocitat i perfil variables. Amb aquest objectiu, durant molt de temps s'han definit diferents cicles per part de les autoritats competents. Actualment existeixen molts tipus diferents de cicles, simulant diferents tipus de conducció.

El principal avantatge del primer tipus de càlcul és la facilitat de realitzar-lo, tot i els resultats poc realistes obtinguts. La segona opció aconsegueix resultats molt més realistes comparats amb la realitat, i afortunadament, gràcies als avenços tecnològics, mitjançant programes informàtics es poden realitzar càlculs molt complexes en poc temps. Per aquest

motiu, es decideix realitzar una simulació per ordinador amb el programa MATLAB® utilitzant l'eina Simulink, que permet simular un sistema dinàmic amb certa facilitat.

9.2. Cicles de conducció:

Durant anys, diferents cicles han estat desenvolupats per tal de simular l'emissió de partícules d'un vehicle en situació de circulació real i obtenir dades realistes i pràctiques d'aquestes emissions. Alguns exemples són, per exemple, el cicle LA-4, basat en les condicions reals de tràfic de la ciutat de Los Angeles. En aquest cas concret, es simulen 1500 segons on cada segon té una velocitat diferent, com es pot veure a la *Figura 9.1*.

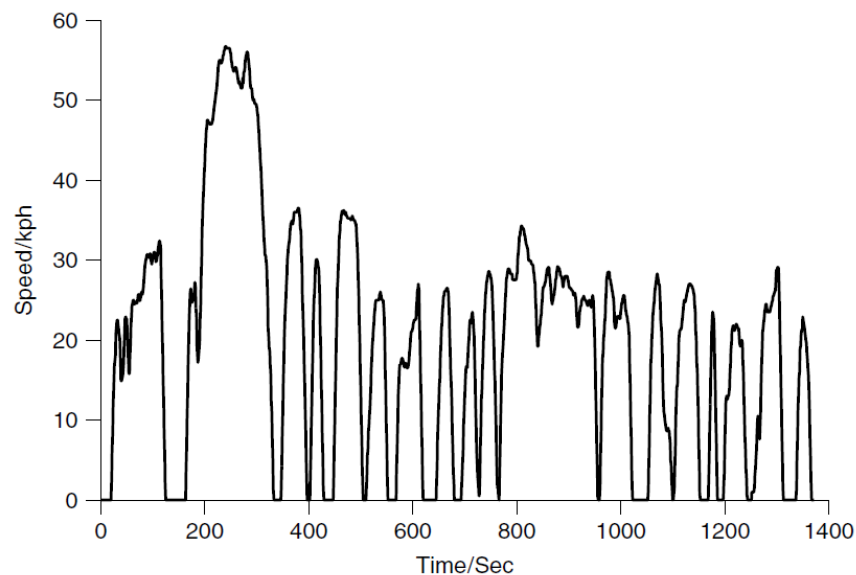


Figura 9.1: Perfil de velocitats del cicle LA-4. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Una versió simplificada del cicle anterior és el cicle SFUDS, que es veu escurçat fins als 360 segons, on cada segon té una velocitat diferent també, i per tant el número de dades es veu àmpliament reduït de 1500 a 360. Aquest cicle té exactament la mateixa velocitat mitja, la mateixa proporció de temps estacionari i els mateixos valors d'acceleració i frenada màximes. Amb tot això, els resultats són molt similars als del cicle LA-4 quan es simula l'autonomia d'un vehicle. La *Figura 9.2* mostra el perfil de velocitats del cicle SFUDS.

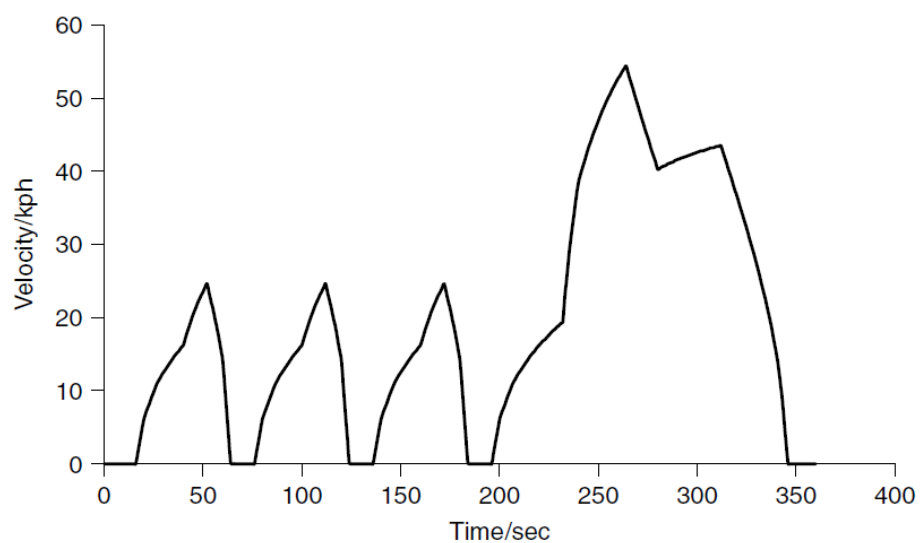


Figura 9.2: Perfil de velocitats del cicle SFUDS. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

A l'àmbit europeu, un cicle molt utilitzat per tal de simular el comportament de vehicles petits és l'ECE-15. Aquest cicle simula la conducció urbana durant 195 segons, combinant acceleracions i frenades constants, conjuntament amb períodes a velocitat constant i aturat. El perfil de velocitats d'aquest cicle es mostra a la *Figura 9.3*.

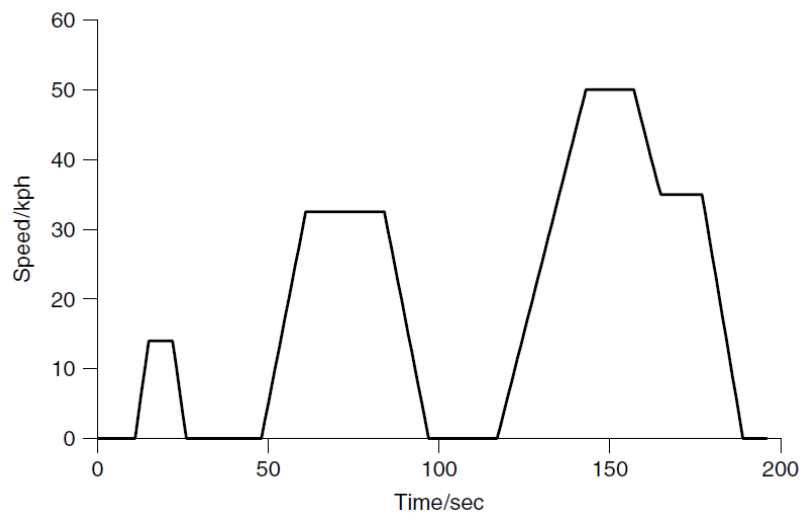


Figura 9.3: Perfil de velocitats del cicle ECE-15. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

A les regions asiàtiques, un cicle amb cert interès és el SAE J227a. Aquest cicle combina una acceleració constant fins a una velocitat màxima, amb un període a velocitat màxima constant, seguit d'un temps on el vehicle frena sense realitzar esforç ni tractor ni de frenada, i finalitza amb una frenada constant i un temps d'inactivitat.

Un dels avantatges d'aquest cicle és que té 4 variacions en funció de les prestacions del vehicle, per ajustar la conducció a la real. A la *Figura 9.4*, conjuntament amb la Taula 9.1, on per a cada variació podem veure els valors dels paràmetres. La variació més utilitzada és la C, molt útil en casos de escúters o petits vehicles elèctrics per a us urbà.

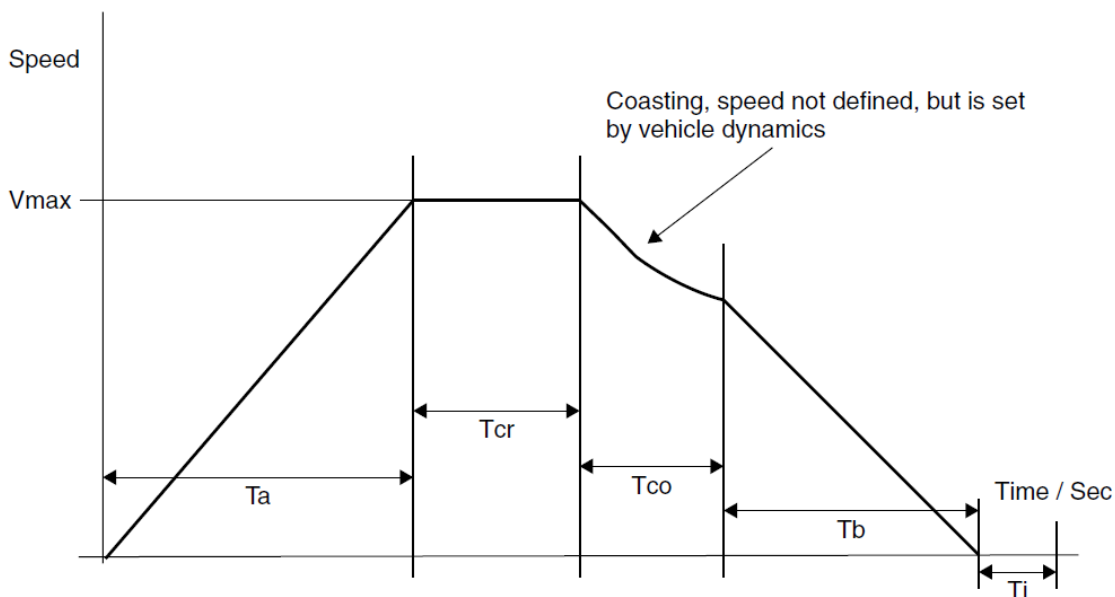


Figura 9.4: Perfil de velocitats parametric del cycle SAE J227a. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Paràmetre	Unitat	Cicle A	Cicle B	Cicle C	Cicle D
Velocitat màxima	km/h	16	32	48	72
Temps d'acceleració T_a	s	4	19	18	28
Temps de creuer T_{cr}	s	0	19	20	50
Temps de potencia nul·la T_{co}	s	2	4	8	10
Temps de frenada	s	3	5	9	9
Temps d'aturada	s	30	25	25	25
Temps total	s	39	72	80	122

Taula 9.1. Paràmetres de les diferents variants del cycle SAE J227a. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

De cara al càlcul, el període de temps sense esforç és una complicació, donat que el perfil de velocitat és indeterminat, només la dinàmica del vehicle determina la velocitat en cada moment. Aquesta indeterminació sovint es substitueix per una frenada suau de cara a obtenir resultats similars.

Un altre cycle amb semblants característiques és l'europeu ECE-47, molt utilitzat en la prova d'emissions d'algunes motocicletes de baixa cilindrada, i en la simulació d'autonomia de motocicletes elèctriques de petita potència. Com en el cas del cycle anterior, en algun moment la velocitat no queda definida, pel que apareixen complicacions durant el càlcul. El

cicle consisteix en accelerar amb tota la potència des del vehicle aturat fins a la velocitat màxima durant 50 segons, amb una posterior desacceleració durant 15 segons fins als 20km/h, un manteniment d'aquesta velocitat durant 35 segons, i finalment s'atura, amb una frenada constant durant 8 segons. Aquest perfil de velocitats es pot observar a la *Figura 9.5*.

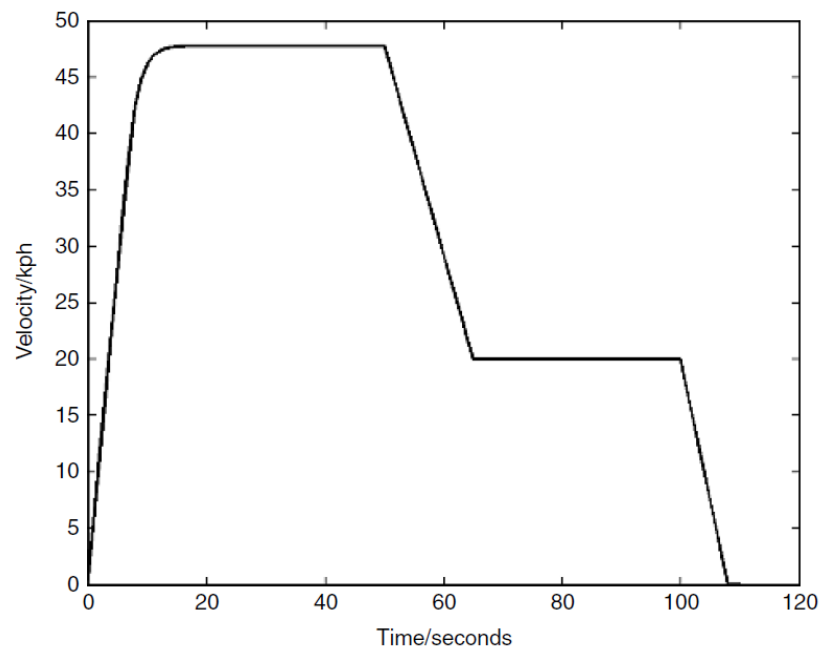


Figura 9.5: Perfil de velocitats del cicle ECE-47. Font: *Electric Vehicle Technology Explained*, Larminie J.

Però aquests són només alguns exemples de cicle que s'ajusten prou bé al que es vol simular en aquest projecte. A altres nivells podem trobar cicles que simulin el comportament de vehicles en conducció fora de ciutats o cicles que incorporin tots dos tipus de conducció. A nivell europeu, un exemple de conducció per carretera seria el cicle EUDC, que combinat amb 4 repeticions del cicle ECE-15, formen el cicle NEDC.

9.3. Elecció del cicle

Per tal de realitzar les simulacions necessàries de cara a determinar l'autonomia del vehicle i la capacitat de la bateria, cal definir un dels cicles existents com a patró. Aquest patró cal repetir-lo tantes vegades com sigui necessari per tal d'aconseguir l'autonomia desitjada. Llavors, simulant el consum de l'equip de tracció durant un sol cicle, es pot calcular el consum necessari per assolir l'autonomia especificada.

El cicle LA-4 és interessant pel fet d'estar basat en dades reals, però és excessivament complex i té una excessiva quantitat de dades de velocitat al llarg del temps que cal introduir a la simulació.

El cicle SFUDS té característiques similars al LA-4. Tot i mantenir els requisits del primer, i per tant basats en casos reals, segueix essent complex encara que té menor número de dades a especificar.

El cicle ECE-15 té un perfil de velocitats fàcil de reproduir. Malgrat això, és un cicle que sovint és criticat per no tenir una bona correlació amb l'estil de conducció de la majoria de conductors.

El cicle SAE J227a és molt interessant per l'adaptabilitat que té al tipus de vehicle que s'estudia. Els paràmetres i les 4 variants definides permeten estudiar una gran quantitat de casos, però per altra banda, el període de temps amb velocitat indeterminada complica la seva implementació en la simulació.

El cicle ECE-47 té també problemes per implementar en la simulació degut també a un període amb velocitat indeterminada, i tampoc sembla tenir un comportament gaire semblant al dels conductors habituals.

En base a les descripcions especificades dels cicles anteriors, cal tenir en compte que el cicle que millor relació entre resultats i complexitat de càlcul i implementació té, és el ECE-15. Per aquest motiu, es decideix utilitzar el cicle ECE-15 com a patró del comportament del vehicle.

Es defineix el cicle ECE-15 en les següents operacions, segons la normativa de la UNECE:

Número Operació:	Tipus Operació:	Acceleració [m/s ²]:	Velocitat [km/h]:	Durada [s]:	Temps total [s]:
1	Aturada	0.00	0	11	11
2	Acceleració	1.04	0-15	4	15
3	Velocitat constant	0.00	15	8	23
4	Desceleració	-0.83	15-0	5	28
5	Aturada	0.00	0	21	49
6	Acceleració	0.69	0-15	6	55
7	Acceleració	0.79	15-32	6	61
8	Velocitat constant	0.00	32	24	85
9	Desceleració	-0.81	32-0	11	96
10	Aturada	0.00	0	21	117
11	Acceleració	0.69	0-15	6	123
12	Acceleració	0.51	15-35	11	134
13	Acceleració	0.46	35-50	9	143
14	Velocitat constant	0.00	50	12	155
15	Desceleració	-0.52	50-35	8	163
16	Velocitat constant	0.00	35	15	178
17	Desceleració	-0.97	35-0	10	188
18	Aturada	0.00	0	7	195

Taula 9.2. Operacions a realitzar durant el cicle ECE-15. Font: Normativa UNECE.

Entre les dades més importants d'aquest cicle, el temps de funcionament d'un cicle és de 195 segons, la velocitat mitja és de 18,77km/h i la distància teòrica recorreguda és de 1017m [5].

9.4. Modelització del vehicle

Per tal de modelitzar de manera molt simple el comportament dinàmic, utilitzant MATLAB Simulink es defineix un cicle com un conjunt de punts on a cada instant de temps li correspon una velocitat determinada.

A partir d'aquí, es modelitzen les forces que actuen sobre el vehicle, descrites en forma de potència a l'apartat 8. Aquestes forces prenen valor en funció de diferents paràmetres, alguns dels quals queden fora de l'abast d'aquest projecte, alhora que alguna de les relacions necessàries al model també queden fora d'aquest. Per aquest motiu, alguns dels paràmetres es prenen com a aproximats, a partir dels màxims permesos per la normativa d'homologació, de valors extrets de les alternatives plantejades a l'apartat 3, o simplement

valors necessaris pel correcte funcionament del vehicle. Els valors que apareixen al model i la seva elecció són els següents:

1. Massa del vehicle: A partir de la normativa d'homologació es decideix prendre un valor de 600kg pel vehicle buit i sense bateries. A partir d'una primera observació del mercat es pren un valor de 100kg per a la massa de les bateries, i un valor de 80kg per a la massa d'un passatger.
2. Àrea frontal: A partir dels valors aproximats extrets de les diferents alternatives de l'apartat 3, es decideix prendre un valor de 2m^2 .
3. Coeficient de fricció aerodinàmica: A partir de valors aproximats, es decideix prendre un valor de 0,7.
4. Coeficient de fricció al rodolament: A partir de valors aproximats, es decideix prendre un valor de 0,013.
5. Radi de les rodes: A partir dels valors extrets de les diferents alternatives de l'apartat 3, es pren un valor de 0,3m.
6. Reductora de velocitat: A partir del valor de la màxima velocitat del motor escollit i la velocitat màxima legal del vehicle de 90km/h, es decideix prendre el valor de la relació de transmissió de la reductora de velocitat necessari per tal de que corresponguin ambdues velocitats.
7. Constant electromecànica del motor: A partir del valor obtingut pel fabricant del motor escollit.

Així doncs, un cop modelitzades les forces, es sumen per tal de conèixer la força total a la que ha de fer front el vehicle en qualsevol moment. Un cop sumades, la força resultant cal multiplicar-la pel valor del radi de les rodes per tal de trobar el parell a la sortida de la reductora. Amb la relació de transmissió, es troba el valor de parell efectuat pel motor, i mitjançant la constant electromecànica d'aquest, es pot trobar el valor de corrent elèctric necessari per tal de realitzar aquesta força.

La intensitat trobada no és exactament la que consumeix el conjunt del vehicle en cada instant, donat que tots els elements tenen un cert rendiment, unes resistències internes i alguns elements no es consideren en aquesta simulació, com el consum dels llums, però pot donar una bona idea de la capacitat necessària per tal d'acomplir els requeriments d'autonomia desitjats.

A la *Figura 9.6* es mostra la implementació del sistema a Simulink:

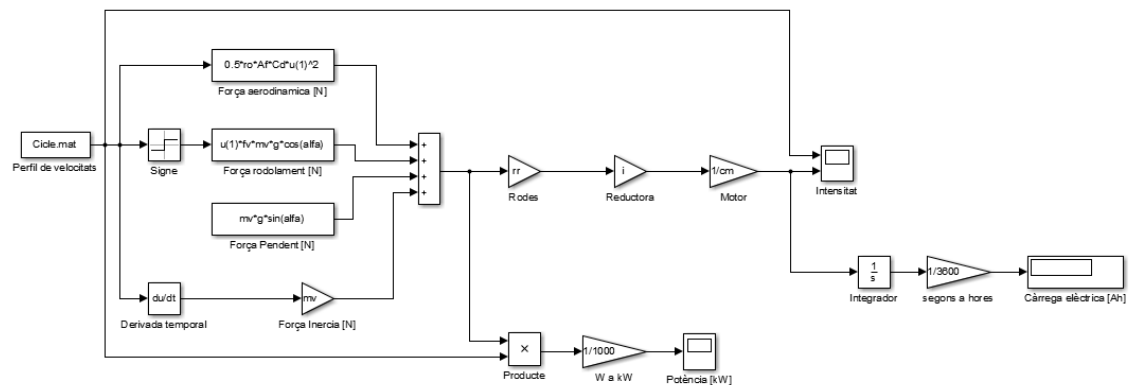


Figura 9.6: Implementació del sistema dinàmic de la cadena de tracció amb Simulink.

Cal destacar que n'hi ha prou amb simular un cicle, obtenir el valor de càrrega elèctrica necessària en Ah, i multiplicant-lo pel número de cicles, es pot obtenir la capacitat total necessària per obtenir l'autonomia fixada.

Adicionalment, i per tal de comprovar que el vehicle és capaç de realitzar el cicle, es multiplica la força total per la velocitat per tal d'obtenir la potència instantània, en kW i comprovar que es trobi per sota del valor màxim del motor. Simulant el sistema, tot i no tenir valors per a la part elèctrica, obtenim que la potència de pic màxima necessària és d'aproximadament 10kW, pel que la potència màxima del motor escollit ha de ser superior a aquest valor per tal de validar el model.

10. Especificacions requerides

Per tal de començar el procés de definir els components amb els que implementar la cadena de tracció del vehicle, és necessari primer definir una sèrie d'especificacions de funcionament requerides. Aquestes marquen bàsicament les prestacions finals del vehicle.

Algunes especificacions venen requerides per la normativa d'homologació i d'altres són de lliure elecció, però cal fixar-les de forma correcta per tal de no sobredimensionar-les.

10.1. Normativa d'homologació

Per tal d'homologar el vehicle a la categoria L7e, és necessari que algunes de les especificacions no superin les limitacions imposades per la normativa.

Cal tenir en compte que el vehicle té consideració de quadricicle pesat per al transport de mercaderies, pel que queda inclòs a la subcategoria L7e-CU.

Així doncs, i segons la normativa d'homologació, les especificacions requerides són les següents [6]:

- Potència màxima inferior o igual a 15kW.
- Massa en ordre de marxa sense incloure bateries de fins a 600kg.
- Velocitat màxima del vehicle per construcció igual o inferior a 90km/h.

Entre d'altres, que fan referència a dimensions.

Cal tenir en compte que la potència no pot ser en cap cas superior a 15kW, pel que cal incloure els pics de potència dins d'aquesta limitació. Per tant, no es defineix la potència nominal, sinó la potència de pic.

10.2. Altres especificacions

Un cop descrites les especificacions fixades per la normativa, encara queden alguns paràmetres de les prestacions que necessiten ser fixats.

L'especificació més important a fixar és l'autonomia. En base a les alternatives disponibles al mercat, estudiades a l'apartat 5, es decideix fixar una autonomia propera als 100km. Per tal de poder realitzar simulacions amb el cicle ECE-15 escollit a l'apartat anterior, es

determina que l'autonomia són 100 repeticions d'aquest cicle, prop de 102km.

Per posar en context, aquests 100km d'autonomia permeten realitzar dues voltes i mitja a la ciutat de Barcelona seguint el recorregut de les seves rondes de circumval·lació. Realitzant cicles ECE-15, suposen gairebé 5 hores i mitja de conducció.

Aquestes dades semblen més que suficients per tal de poder realitzar una jornada de treball en el cas del repartiment de mercaderies a una ciutat.

En el cas del pendent màxim que ha de ser capaç de remuntar el vehicle, es decideix fixar-lo en un 20%, que és el valor de pendent màxim que permet la Normativa Urbanística Metropolitana de l'Àrea Metropolitana de Barcelona.

Per tal de garantir el correcte funcionament del vehicle en aquestes condicions de rampa molt elevada, es defineix una velocitat mínima que hauria de ser capaç d'aconseguir el vehicle en aquestes condicions de 20km/h.

11. Elecció dels components

De cara a poder construir el vehicle, és necessari cercar components disponibles al mercat i identificar quins s'ajusten millor a les característiques desitjades. També s'ha de seleccionar la tecnologia amb la que implementar alguns dels components i fins i tot discutir l'arquitectura de la cadena de tracció.

Els components a seleccionar són:

- Motor de tracció
- Convertidor de tracció
- Bateria
- Sistema de gestió de la bateria (BMS)
- Carregador de la bateria
- Convertidor secundari

En quant a l'arquitectura, es decideix estudiar quina alternativa és més adequada, tenir un sol motor per a l'eix posterior o un per a cada roda d'aquest.

A l'Annex A s'inclouen els fulls de característiques de cadascun d'aquests components.

11.1.Motor de tracció

La tria del motor de tracció és de gran importància. Les propietats d'aquest determinen gran part de la massa de la cadena de tracció, el consum de corrent i la dimensió de les bateries, entre d'altres.

És per tant interessant comparar diferents alternatives i diferents tecnologies per tal de trobar un component adequat. A continuació s'exposen les 3 millors alternatives trobades, que han estat seleccionades per tal de prendre la decisió final.

Motor	Motenergy ME0780	GoldenMotor HPM48-5000*	GoldenMotor HPM96-10000
Tipus	CC d'imants permanents	CA brushless	CA brushless
Potència nominal	4,8kW	5,4kW	10kW
Potència de pic	15kW	6,7kW	13,2kW
Voltatge nominal	48Vcc	48Vca	96Vca
Intensitat màxima	300A	176,4A	161,4A
Velocitat màxima	5000rpm	4400rpm	4700rpm
Constant de parell	0,13Nm/A	0,1Nm/A	0,2Nm/A
Massa	12,7kg	11,35kg	17,7kg
Ventilació	Aire	Aigua	Aigua
Preu	470€	353,80€	594,14€

Taula 11.1. Propietats de diferents motors. Font: Motenergy, GoldenMotor.

*: Per tal d'aconseguir la potència de pic desitjada, és necessari instal·lar dos motors, un a cada roda de l'eix motriu.

Per una banda, el motor Motenergy permet més potència de pic i té un preu més econòmic, però té menys potència nominal. Addicionalment, cal recordar que els motors de corrent continu, tot i ser aquest d'imants permanents a l'estator, tenen un cost de manteniment més elevat.

Per l'altra banda, els motors GoldenMotor tenen un preu més elevat, especialment en el cas d'optar per dos motors de 5kW, però requereixen menys manteniment al ser brushless, i permeten potències nominals més elevades. Les potències de pic són similars entre ambdós, lleugerament superior en el cas d'optar pels dos motors de 5kW. És especialment interessant però l'opció del motor brushless de 10kW per la major capacitat de generar parell amb la mateixa intensitat, tot i treballar a un voltatge més elevat, i les diferències de pes entre els dos motors de 5kW i l'únic motor de 10kW.

Donats els avantatges de manteniment, es decideix optar per un motor brushless, i donada la diferència entre pesos i consum, es pren la decisió d'optar pel motor GoldenMotor HPM96-10000.



Figura 11.1 Vista del motor GoldenMotor HPM96-10000, refrigerat per aigua.
Font: GoldenMotor.

11.2. Convertidor de tracció

El convertidor de tracció té la missió d'adaptar el corrent que surt de la bateria a les necessitats del motor. Per aquest motiu es decideix optar per l'opció que el fabricant del motor, GoldenMotor, ofereix com a recomanada per al motor HPM96-10000.

Aquesta opció és el convertidor model VEC500/96Vdc, que fabrica GoldenMotor, que té una àmplia gamma de convertidors d'entre 1kW a 20kW, amb voltatges de 48V a 96V.

Al manual d'aquests indica que són convertidors amb tecnologia MOSFET, que ofereixen una conducció suau i són silenciosos. Permeten regenerar energia en la frenada i diferents tipus de conducció, amb control de velocitat de creuer.

En concret, el model VEC500/96Vdc permet corrents nominals de fins a 120A i un corrent de fase màxim de fins a 450A.



Figura 11.2 Vista del convertidor VEC500/96Vdc de GoldenMotor, recomanat pel motor HPM96-10000. Font: GoldenMotor.

El mètode de control és del tipus Control per Orientació del Camp, on l'orientació del camp magnètic creat per les bobines de l'estator és controlada per tal de que mantingui un cert angle relatiu amb l'orientació del camp magnètic creat per l'imant permanent del rotor, tal com es veu a la *Figura 11.3*.

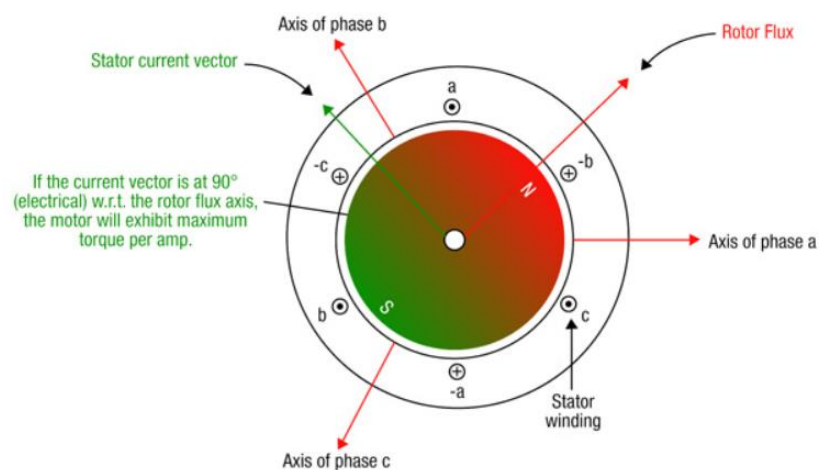


Figura 11.3: Control per Orientació del Camp. Font: GoldenMotor.

11.3. Bateria

BatterySpace ofereix mòduls per a bateries d'Ió-Liti amb la tecnologia LiFePO₄, de les que millors resultats ofereixen. Cadascun d'aquest mòduls té una caiguda de voltatge de 3,2V, l'habitual en les cel·les d'Ió-Liti, i una capacitat d'entre 20Ah i 200Ah. El fabricant assegura una vida útil de fins a 1500 cicles d'us en una bateria composta per diferents mòduls. Aquests mòduls ofereixen una estructura especialment preparada per la interconnexió entre ells i amb el BMS, mentre que la tecnologia LiFePO₄ ofereix bons resultats de vida útil i són més segures que d'altres, donat que no ocasionen explosions ni incendis en ser curtcircuitades o travessades per altes objectes.

11.3.1. Número de mòduls

Donades les necessitats de caiguda de voltatge per tal d'alimentar el motor elèctric escollit a l'apartat 11.1, amb una caiguda de voltatge nominal de 96V, i la caiguda de voltatge nominal d'un sol mòdul de 3,2V, tenint en compte que la caiguda de tensió de la bateria es relaciona amb el número de mòduls en sèrie mitjançant l'Equació 13.1:

$$U_{bat} = N_s \cdot U_c \quad \text{Equació 11.1}$$

On cada terme és:

U_{bat} : Caiguda de tensió entre borns de la bateria [V].

N_s : Nombre de cel·les en sèrie.

U_c : Caiguda de tensió d'una cel·la [V].

És necessari doncs que la bateria consti de 30 mòduls connectats en sèrie.

Per tal de calcular el número de mòduls connectats en paral·lel és necessari utilitzar la simulació descrita a l'apartat 9.4.

Ara ja es coneixen la totalitat de paràmetres que intervenen en la simulació, doncs es coneix el valor de la constant electromecànica del motor (0,2Nm/A) i de la velocitat màxima d'aquest (4700rpm).

Realitzant la simulació, s'obté un valor de 1.5Ah per un sol cicle, per tant, la capacitat necessària per obtenir una autonomia de 100km són aproximadament 150Ah. Per tal

d'aconseguir aquesta autonomia, es decideix utilitzar mòduls de 40Ah. La capacitat total de la bateria i la capacitat d'una cel·la es relacionen mitjançant l'Equació 11.2. Un total de 4 blocs en paral·lel de 30 mòduls en sèrie cada bloc componen la bateria, donant els valors desitjats de 96V i 160Ah.

$$Q_{bat} = N_p \cdot Q_c$$

Equació 11.2

On cada terme és:

Q_{bat} : Capacitat total de la bateria [Ah].

N_p : Nombre de blocs en paral·lel.

Q_c : Capacitat d'una cel·la [Ah].

Cada mòdul de 3.2V i 40Ah té unes dimensions de 126mm de llarg, 46mm d'ample i 180mm d'alçada, i una massa de 1,4kg.



Figura 11.4 Vista d'un mòdul LFP-G40 de 3,2V de voltatge nominal i 40Ah de capacitat. Font: BatterySpace.

11.4.BMS

El fabricant de la bateria, BatterySpace, recomana utilitzar el sistema BMS que ells han desenvolupat per les seves pròpies bateries.

El sistema BMS que ofereixen pot operar fins a 140 cel·les, amb un corrent màxim de 500A i una càrrega màxima de 500Ah. Conté la CPU, que funciona amb una tensió nominal d'entre 8V i 20V, i un corrent de 120mA, i tots els components necessaris pel funcionament, inclosa una pantalla LCD.

Ofereixen a més, l'opció de comprar el BMS amb sistema de comunicació CANBUS, per tal de comunicar-se amb la centralita electrònica del vehicle. Una altra opció que s'ofereix és incorporar dos relés de protecció, tant de càrrega com de descàrrega, per tal d'evitar corrents de més de 500A.



Figura 11.5 Vista del BMS, amb els components que el formen. Font: BatterySpace.

Donada la recomanació del fabricant de les bateries, s'opta per aquest producte per tal d'implementar el sistema BMS. Per tal d'integrar el sistema en el circuit electrònic es decideix incorporar el sistema de comunicació amb la centralita electrònica. Addicionalment, es decideix protegir tot el sistema, tant el BMS com la bateria, incorporant els dos relés de protecció.

11.5. Carregador de la bateria

Per tal de simplificar la instal·lació de càrrega i permetre la connectivitat amb la majoria d'instal·lacions es decideix incorporar un sistema de càrrega del tipus Normal i del Mode 1.

Aquest tipus i mode impliquen que el carregador es pugui connectar a qualsevol endoll monofàsic de 220V, pel que permet una àmplia flexibilitat i no implica que l'usuari necessiti construir una instal·lació concreta per tal de carregar el vehicle.

En aquest cas s'opta pel model D96V/15A-1500D del fabricant Kelly Controller. Aquest carregador permet obtenir 15A a la sortida, de 96Vcc, a diferència dels altres models que ofereix el mateix fabricant de 7A i 10A, pel que ajuda a tenir una recàrrega més ràpida.



Figura 11.6 Vista general del carregador D96V/15A-1500D. Font: Kelly Controller.

En quant a les prestacions, l'entrada del dispositiu és de 220V, té una potència màxima de 1500W, una eficiència entre el 95% i el 98% i un factor de potència de 0,96. Amb aquests valors es pot calcular el corrent màxim d'entrada, mitjançant l'Equació 11.3. Aquest resulta en aproximadament uns 7A, pel que queda dins dels màxims requerits.

$$U_{In} \cdot I_{In} \cdot \cos(\varphi) \eta = U_{Out} \cdot I_{Out}$$

Equació 11.3

On cada terme és:

U_{In} : Voltatge d'entrada [V].

I_{In} : Corrent d'entrada [A].

$\cos(\varphi)$: Factor de potència.

η : Rendiment del convertidor.

U_{Out} : Voltatge de sortida [V].

I_{Out} : Intensitat de sortida [A].

El carregador inclou proteccions per al sobrevoltatge, la sobreintensitat i curtcircuit, pel que es pot fer servir amb el Mode 1 de càrrega.

11.6. Convertidor secundari

Pel convertidor secundari es selecciona el model DC/DC converter 96V a 12V de la sèrie HWZ, novament del fabricant Kelly Controller.

Amb una potència màxima de 300W, més que suficient per tal d'alimentar els components electrònics del vehicle, s'alimenta a 96Vcc i és capaç de donar 12Vcc i fins a 25A a la sortida. Per tal de garantir la protecció dels circuits incorpora limitador de tensió, protecció contra curtcircuits, protecció per temperatura i aïllament entre els circuits d'entrada i sortida.



Figura 11.7 Vista general del convertidor dc/dc de 96Vcc a 12Vcc. Font: Kelly Controller.

12. Prestacions finals

Un cop trobats els components que formen la cadena de tracció del vehicle, és necessari calcular les prestacions definitives del vehicle. Per tal de fer-ho es fan servir les relacions i prestacions definides a l'apartat 8 d'aquest projecte.

Alguns dels paràmetres necessaris per la realització dels càlculs queden fora de l'abast d'aquest projecte, pel que s'utilitzen valors aproximats, basats en altres alternatives presents al mercat, com les estudiades a l'apartat 3 del projecte, o simplement en components genèrics que permetin el funcionament desitjat del vehicle.

Altres paràmetres es fixen amb els valors obtinguts dels productes comercials definits. Per exemple, la potència del motor màxima o el pes del vehicle.

En el cas de la massa del vehicle, donat que no es coneix la massa del xassís, es decideix utilitzar el valor màxim que permet la normativa d'homologació, 600kg sense bateries, i sumar la massa de la bateria, 168kg, i d'una persona, 80kg. En total, 848kg.

12.1. Velocitat màxima

Utilitzant el valor de potència màxima del motor de 13,2kW, un rendiment aproximat de la transmissió del 90% i la massa calculada anteriorment, a més dels valors d'àrea frontal i coeficients de fricció descrits a l'apartat 9.4.

Així doncs, utilitzant l'equació 8.8, es calcula una velocitat màxima teòrica del vehicle de 80,27km/h, inferior als 90km/h exigits per a la homologació.

12.2. Càrrega màxima

Ara s'utilitzen els valors de potència màxima, rendiment i coeficients descrits a l'apartat anterior, però una massa de 848kg en buit més una certa càrrega, que cal determinar.

L'especificació de rampa màxima que cal que el vehicle pugui superar és del 20%, amb una velocitat mínima de 20km/h. Amb l'Equació 8.10 es pot obtenir l'angle, i introduint els valors anteriors a l'Equació 8.9 es pot determinar la massa màxima que el vehicle pot carregar en aquestes circumstàncies.

El valor obtingut és de 185kg.

12.3. Autonomia

Per tal d'analitzar l'autonomia aproximada del vehicle, es torna a utilitzar el model de simulació amb MATLAB Simulink descrit a l'apartat 9.4.

En aquesta ocasió, però, es decideix utilitzar un valor de massa consistent en els 848kg del vehicle amb bateries i conductor, sumant la meitat de la càrrega màxima que s'ha trobat a l'apartat anterior, en total, 940kg.

Per tal d'alleugerir el treball del motor elèctric, i donat que la velocitat màxima teòrica del vehicle no és superior a 80km/h, es decideix optar per una nova relació de transmissió que ajusti la velocitat màxima del motor elèctric a aquests 80km/h.

Sota aquestes característiques, la capacitat necessària per tal de dur a terme un cicle ECE-15 és de 1,526Ah, i la potència màxima necessària és d'aproximadament 11kW. Amb el segon valor podem comprovar que el vehicle és capaç de realitzar el cicle amb la potència màxima del motor.

Donada la capacitat de 160Ah de les bateries, el vehicle pot realitzar fins a 104 cicles complets, el que equival a uns 106km d'autonomia aproximada a mitja càrrega.

Prestació	Valor
Potència màxima en règim continu [kW]	10
Potència màxima de pic [kW]	13,2
Velocitat màxima [km/h]	80
Massa en buit [kg]	768
Càrrega màxima [kg]	185
Màxim pendent [%]	20
Bateria	Ió-Liti, 120 cel·les
Voltatge nominal de la bateria [V]	96
Capacitat nominal de la bateria [Ah]	160
Autonomia* [km]	100

Taula 12.1. Prestacions del vehicle.

*: Valor aproximat, en funció de les característiques de càrrega i conducció.

13. Pressupost

El pressupost d'aquest projecte, desglossat en els diferents conceptes, és el següent:

Codi	Referència	Descripció	Unitats	Preu Unitari	Subtotal	Acumulat
1	HPM96-10000	Motor Brushless 10kW	1	594,14 €	594,14 €	594,14 €
2	VEC500/96Vdc	Convertidor cc/ca 96V 10kW	1	657,22 €	657,22 €	1.251,36 €
3	LFP-G40	Mòdul LiFePO4 3,2V 40Ah	120	58,28 €	6.993,60 €	8.244,96 €
4	BMS-EP128	Sistema de Gestió de la Bateria	1	402,05 €	402,05 €	8.647,01 €
5	D96V/15A-1500D	Carregador de la Bateria	1	401,15 €	401,15 €	9.048,16 €
6	-	Convertidor HWZ Series 96Vcc a 12Vcc 300W	1	115,25 €	115,25 €	9.163,41 €
7	-	Cablejat*	-	-	200,00 €	9.363,41 €
8	-	Imprevistos	-	-	500,00 €	9.863,41 €
Codi	Referència	Descripció	Hores	Preu per Hora	Subtotal	Acumulat
A1	Desenvolupament	Hores de desenvolupament del projecte	180	20,00 €	3.600,00 €	13.463,41 €
A2	Components	Hores de recerca dels components	60	20,00 €	1.200,00 €	14.663,41 €
A3	Redacció	Hores de redacció de la memòria	40	20,00 €	800,00 €	15.463,41 €
A4	Prova	Hores de prova dels components	20	20,00 €	400,00 €	15.863,41 €
A5	Muntatge	Hores de muntatge dels components	150	20,00 €	3.000,00 €	18.863,41 €
					Total	18.863,41 €

Taula 13.1. Pressupost.

*: Valor aproximat.

Inclou tant els diferents components, com el preu de la confecció d'aquest projecte, com els salaris als treballadors per tal de comprovar el correcte funcionament dels components un cop rebuts i procedir a la seva instal·lació.

Addicionalment, es decideix incloure una partida en concepte d'imprevistos, per si durant el muntatge del prototip apareix qualsevol imprevist.

14. Planificació temporal

Per tal de poder realitzar el muntatge del prototip, es realitza una planificació temporal dels treballs a fer.

Primerament es preveu un temps de 5 dies des de l'inici dels treballs per rebre els components i el xassís. A continuació es preveuen treballs de preparació del xassís i de prova dels components elèctrics. Aquestes tasques es permeten fer alhora, donat que la prova dels components implica poca càrrega de treball.

Durant el propi muntatge, es realitza la situació dels components al xassís, l'ancoratge dels mateixos i la connexió entre ells. Finalment, es preveuen uns certs temps de proves tant estàtiques com dinàmiques del vehicle complet.

En total, es preveu un període de 36 dies per al muntatge complet.

La planificació temporal pel muntatge del prototip es mostra en el següent diagrama de Gantt:

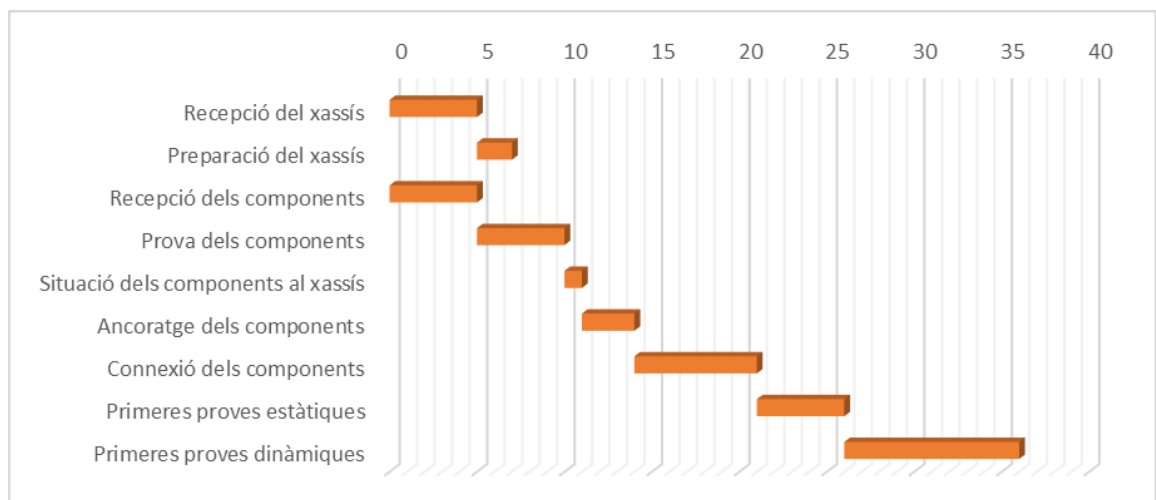


Figura 14.1 Diagrama de Gantt de la planificació temporal del projecte.

15. Impacte ambiental

Aquest projecte ajuda a reduir l'impacte ambiental de la mobilitat urbana i el repartiment de mercaderies.

Si bé és cert que no depèn exclusivament d'aquest projecte reduir les emissions de contaminants a l'atmosfera, el vehicle elèctric és un bon camí per tal d'aconseguir les reduccions de contaminants que els governs d'arreu del món es proposen.

El vehicle elèctric possibilita la utilització d'energies renovables, que es poden obtenir de forma que l'impacte sobre el medi ambient sigui mínim. D'aquesta manera, permet reduir la dependència dels combustibles fòssils, un dels principals conflictes que presenta la utilització de vehicles amb motors de combustió interna.

Adicionalment, l'ús d'energies renovables per a la mobilitat permet reduir les emissions d'elements contaminants a les ciutats, que es troben sovint saturades d'aquests i tenen greus problemes de qualitat de l'aire.

La majoria d'aquests beneficis en matèria d'impacte ambiental, però, depenen de les prioritats d'obtenció d'electricitat de cada país. Si un país prioritza les energies renovables com a font d'obtenció d'energia elèctrica, els beneficis del vehicle elèctric en aspectes mediambientals es maximitzen, donat que les emissions de contaminants es redueixen dràsticament.

És important per això, que els governs s'impliquin tant en incentivar la compra i l'ús de vehicles elèctrics com en incentivar l'ús d'energies renovables per obtenir electricitat. Només així s'aconsegueix la desitjada reducció de la contaminació ambiental a les ciutats en particular, i en general a tot el territori.

En quant a la construcció del vehicle que ocupa aquest projecte, l'energia necessària és bàsicament per tal d'unir els diferents components entre ells. La soldadura de components per tal de tenir unió elèctrica no té un gran impacte ambiental, i es pot realitzar amb electricitat procedent de l'aprofitament d'energies renovables.

Algunes unions elèctriques entre components, com és el cas de les unions dels mòduls de la bateria entre ells, no necessiten de soldadura, ja que es fa mitjançant cargols i plaques metàl·liques. Igualment, la unió mecànica entre els components i el bastidor del vehicle es pot realitzar amb elements mecànics que no necessitin de soldadura, pel que la quantitat d'energia necessària per realitzar aquestes unions és baixa i també es pot aconseguir a partir de fonts d'energia renovables.

Pel que fa al final de la vida útil dels diferents components d'aquest projecte, i el seu desmantellament, la majoria de components elèctrics i electrònics que el componen són reciclables.

La majoria de materials dels que estan formats aquests components elèctrics, com coure, metall, els recobriments de plàstic o els materials semi-conductors dels convertidors són reciclables.

Les bateries d'Ió-Liti són també reciclables, tot i que cal tenir especial cura en el dipòsit i transport de les bateries que aparentment poden semblar esgotades, donat que l'esgotament d'una bateria pot implicar que només algunes cel·les hagin gastat tota la seva càrrega, mentre d'altres poden seguir carregades. Un curtcircuit accidental en aquestes condicions pot ocasionar accidents.

Conclusions

Un cop completat el projecte, ja es té completament caracteritzat la cadena de tracció del vehicle elèctric considerat.

El vehicle elèctric és una bona solució als actuals conflictes que presenta la mobilitat urbana, donat que el propi vehicle no emet partícules contaminants ni utilitza combustibles fòssils.

Els components seleccionats s'ajusten a les especificacions requerides, i es poden trobar al mercat.

Les prestacions finals són similars, i en algun cas superiors a les prestacions dels vehicles similars presents al mercat analitzats, pel que es considera que el vehicle pot realitzar les seves funcions i per tant pot ser una bona alternativa al mercat actual per a particulars o empreses que vulguin realitzar repartiment de mercaderies a entorns urbans.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] HUSAIN, I. *Electric and Hybrid Vehicles*. CRC Press: 2011. ISBN: 978-1-4398-1175-7
- [2] RED ELECTRICA ESPAÑOLA. *Avance del informe del sistema eléctrico Español, año 2016*.
[http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_electrico_2016.pdf, 28 de maig de 2017]
- [3] GENCAT. *Instal·lació d'infraestructura de recàrrega del vehicle elèctric. Col·lecció quadern pràctic número 9*. Institut Català d'Energia: juny del 2016
[http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/04_coleccio_QuadernPractic/quadern_practic/arxius/09_infraestructura_vehicle_electric.pdf, 12 de juny de 2017]
- [4] ICAEN. Punts de recàrrega de vehicle elèctric a Catalunya. Institut Català d'Energia, Dades obertes: Desembre del 2015.
[http://icaen.gencat.cat/ca/l_icaen/dades_obertes/, 12 de juny de 2017]
- [5] UNECE. *Addendum 100, Regulation 101, Revision 3*, p. 50-52
[<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R101r3e.pdf>, 30 de maig de 2017]
- [6] DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA. *Reglamento (UE) nº 168/2013. Anexo I: Clasificación de vehículos*, p.43-50. [<https://www.boe.es/doue/2013/060/L00052-00128.pdf>, 15 de juny de 2017]

Bibliografia consultada

- GUZZELLA L., SCIARRETTA, L. *Vehicle Propulsion Systems*. Springer: 2013. ISBN: 978-3-642-35912-5
- LARMINIE, J., LOWRY, J. *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons, Ltd.: 2003. ISBN: 0-470-85163-5
- MIKOLAJCZAK, C., KAHN, M., WHITE, K., LONG, R. *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assesment*. Springer: 2011. ISBN: 978-1-4614-3485-6